

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra robotiky

Návrh otočného stolu pro 3D skenování

Proposal of the Rotary Table for 3D Scanning

Student: Martin Kantor

Osobní číslo: KAN0199

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Suder

Ostrava 2020

VŠB - Technická univerzita Ostrava
Fakulta strojní
Katedra robotiky

Zadání bakalářské práce

Student: **Martin Kantor**
Studijní program: B2341 Strojírenství
Studijní obor: 2301R013 Robotika
Téma: **Návrh otočného stolu pro 3D skenování**
Proposal of the Rotary Table for 3D Scanning
Jazyk vypracování: čeština

Zásady pro vypracování:

1. Proveďte analýzu současného stavu řešení problematiky.
2. Na základě získaných informací navrhnete varianty řešení otočného stolu pro 3D skenování na úrovni potřebné k jejich vzájemnému objektivnímu porovnání.
3. Nejvhodnější variantu následně rozpracujte do podoby detailního 3D modelu.
4. Výkresovou dokumentaci vypracujte dle pokynů vedoucího práce. Navržené řešení podložte vhodnými výpočty.
5. Práci doložte v elektronické podobě ve formátu MS WORD a konstrukční řešení v CAD systému dle pokynů vedoucího práce.

Seznam doporučené odborné literatury:

1. NOVÁK, Petr. Mobilní roboty: pohony, senzory, řízení. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Robotika, díl 1. ISBN 80-7300-141-1.
2. KÁRNÍK, Ladislav, Radek KNOFLÍČEK a Jozef NOVÁK-MARCINČIN. Robotizace v nestrojírenských oborech: teorie - návrh - stavba - použití. Ostrava: VŠB-Technická univerzita, 2000. Elektronické hledače. ISBN 80-707-8739-2.
3. KOLÍBAL, Zdeněk. Roboty a robotizované výrobní technologie. Brno: Vysoké učení technické v Brně - nakladatelství VUTUM, 2016. ISBN 978-80-214-4828-5.
4. SHIGLEY, Joseph Edward, Charles R. MISCHKE a Richard Gordon BUDYNAS, HARTL, Martin a Miloš VLK, ed. Konstruování strojních součástí. Přeložil Martin HARTL. V Brně: VUTUM, 2010. Překlady vysokoškolských učebnic, sv. 3. ISBN 978-80-214-2629-0.
5. TALÁČKO, Jaroslav a Robert MATIČKA. Konstrukce průmyslových robotů a manipulátorů: teorie - návrh - stavba - použití. Praha: České vysoké učení technické, 1995. Elektronické hledače. ISBN 80-010-1291-3.
6. KULDOVÁ, Olga, Radek KNOFLÍČEK a Jozef NOVÁK-MARCINČIN. Normalizovaná úprava písemností psaných strojem nebo zpracovaných textovým editorem: komentovaná norma s ukázkami. Praha: Fortuna, 1999. Elektronické hledače. ISBN 80-716-8656-5.
7. ČSN ISO 690 Bibliografické citace. Obsah, forma a struktura. Praha: Český normalizační institut, 1996. 32 s.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **Ing. Jiří Suder**

Datum zadání: 20.12.2019

Datum odevzdání: 18.05.2020



prof. Dr. Ing. Petr Novák
vedoucí katedry



prof. Ing. Ivo Hlavatý, Ph.D.
děkan fakulty



Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou diplomovou (bakalářskou) práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové (bakalářské) práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě dne 18.5. 2020

Kanlov.....

Podpis studenta

Prohlašuji, že:

- jsem si vědom, že na tuto moji závěrečnou bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. Zákon o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (dále jen Autorský zákon), zejména § 35 (Užití díla v rámci občanských či náboženských obřadů nebo v rámci úředních akcí pořádaných orgány veřejné správy, v rámci školních představení a užití díla školního) a § 60 (Školní dílo),
- beru na vědomí, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo užít tuto závěrečnou bakalářskou práci nekomerčně ke své vnitřní potřebě (§ 35 odst. 3 Autorského zákona),
- bude-li požadováno, jeden výtisk této bakalářské práce bude uložen u vedoucího práce,
- s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněním užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 Autorského zákona,
- užít toto své dílo, nebo poskytnout licenci k jejímu využití, mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše),
- beru na vědomí, že podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů - že tato bakalářská práce bude před obhajobou zveřejněna na pracovišti vedoucího práce a v elektronické podobě uložena a po obhajobě zveřejněna v Ústřední knihovně VŠB-TUO, a to bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě dne 18.5. 2020.



Podpis studenta

Martin Kantor

Dobrá 464

739 51, Dobrá

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

KANTOR, M. *Návrh otočného stolu pro 3D skenování: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra robotiky, 2020, 83 s. Vedoucí práce: Suder, J.

Bakalářská práce se zabývá návrhem cenově dostupného 3D skenovacího systému pro neprofesionální využití. Navržený systém se skládá z otočného stolu a jeho příslušenství. V úvodu byla provedena analýza technologií 3D skenování, z nichž jedna byla pro navrhovaný systém vybrána. Na základě vybrané 3D skenovací technologie byl vytvořen požadavkový list. Podle požadavků byly navrženy čtyři varianty řešení. Následně byla dle zvolených kritérií vybrána optimální varianta. Dále byla navržena elektronika. Na závěr byl vytvořen detailní model a potřebná technická dokumentace.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

KANTOR, M. *Proposal of the Rotary Table for 3D Scanning: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Engineering, Department of Robotics, 2020, 83 p. Thesis head: Suder, J.

The Bachelor Thesis deals with the design of 3D scanning system at an affordable price for unprofessional usage. Designed system contains of rotary table and his accesories. In the introduction 3D scanning technologies were analyzed and one of them was choosed for designed system. Based on the choosed 3D scanning technology, the sheet of demands was written. According to the requirements, four variants were developed. Subsequently, the optimal variant was choosed according to the selected criteria. After that the electronics was selected. Finally the detailed model and technical documentation were created.

Obsah

Seznam použitých značek a symbolů	10
Seznam obrázků	13
Seznam tabulek	16
Úvod.....	17
1 Analýza současného stavu 3D skenování	18
1.1 Rozdělení 3D skenerů.....	19
1.2 Kontaktní metody destruktivní	20
1.2.1 Automated Cross Sectional Scanning	20
1.3 Kontaktní metody nedestruktivní.....	20
1.3.1 Portálový CMM.....	21
1.3.2 Optický CMM	22
1.4 Bezkontaktní metody ostatní	22
1.4.1 Průmyslové CT	22
1.4.2 Magnetická rezonance	23
1.5 Bezkontaktní metody optické	23
1.5.1 Stereovidění (pasivní triangulace).....	23
1.5.2 Fotogrammetrie (pasivní triangulace)	24
1.5.3 Laser (aktivní triangulace).....	25
1.5.4 Strukturované světlo (aktivní triangulace)	26
1.5.5 Metoda měření doby letu světla	27
1.5.6 Interferometrie	29
1.6 Postup zpracování mračen bodů	32
2 Testování cenově dostupných technologií pro 3D skenování.....	34
2.1 Kinect 360.....	36
2.2 Fotogrammetrie.....	39
3 Požadavkový list	42
4 Varianty řešení	43
4.1 Varianta A.....	43

4.1.1	Rotační stůl.....	43
4.1.2	Stativ mobilního telefonu	44
4.2	Varianta B.....	46
4.3	Varianta C.....	49
4.4	Varianta D.....	52
5	Porovnání variant a výběr optimální varianty	55
5.1	Popis hodnocených kritérií	55
5.2	Hodnocení.....	55
5.3	Metoda porovnání v trojúhelníku párů – váha významnosti	56
5.4	Porovnání variant.....	56
6	Zatížení rotačního stolu.....	58
6.1	Výpočet reakcí	59
7	Výpočet ložisek.....	61
7.1	Ložisko 61811.....	61
7.1.1	Výpočet statické bezpečnosti	61
7.1.2	Odhad třecího momentu ložiska.....	61
7.2	Ložisko 61907.....	62
7.2.1	Výpočet statické bezpečnosti	62
7.2.2	Odhad třecího momentu ložiska.....	62
7.2.3	Výpočet celkového třecího momentu ložisek.....	63
8	Výpočet potřebného kroutícího momentu motoru	64
8.1	Parametry pohybu rotačního stolu	64
8.2	Výpočet dynamického momentu rotujících částí.....	65
8.3	Výpočet potřebného kroutícího momentu krokového motoru.....	66
9	Výběr elektroniky.....	67
9.1	Krokový motor.....	67
9.2	Driver krokového motoru	67
9.3	Řídící jednotka.....	68
9.4	Dálková spoušť fotoaparátu.....	68
9.5	Napájecí zdroj	69

9.6	Výběr dílčích komponent.....	70
9.6.1	Spínač napájení.....	70
9.6.2	Spínač logické funkce.....	70
9.6.3	Konektor napájení	70
9.6.4	Ochranné prvky	71
9.6.5	Deska plošných spojů	71
10	Popis elektrického obvodu	72
10.1	Popis funkce a zapojení obvodu	72
11	Popis rozpracované varianty	73
11.1	Rotační stůl	73
11.2	Stativ	74
12	Celkové náklady.....	75
12.1	Cena 3D tisku.....	75
12.2	Cena nakupovaných komponent	75
13	Závěr	77
14	Použitá literatura	78
15	Přílohy	83

Seznam použitých značek a symbolů

c	Rychlost světla	$[m \cdot s^{-1}]$
d	Disparita odpovídajících si bodů	$[mm]$
d'	Vzdálenost snímaného objektu, metoda měření doby letu světla	$[mm]$
d_l	Průměr díry ložiska	$[mm]$
e	Vzdálenost ložisek v axiálním směru	$[mm]$
f	Fokální vzdálenost stereokamery	$[mm]$
g	tíhové zrychlení	$[m \cdot s^{-2}]$
k_1	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
k_2	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
k_3	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
k_4	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
k_5	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
k_6	Délka strany referenčního tělesa	$[mm]$
m_{max}	Maximální hmotnost skenovaného objektu	$[kg]$
m'	Zatížení ložisek od konstrukce stolu	$[kg]$
n_{max}	Maximální otáčky rotačního stolu	$[rad \cdot s^{-1}]$
p	Počet voleb kritéria	$[-]$
r	Vzdálenost těžiště skenovaného objektu od osy rotace	$[mm]$
s_0	Statická bezpečnost ložiska	$[-]$
t	Doba letu světla	$[s]$
t_a	Doba zrychlování otočného stolu	$[s]$
t_b	Doba ustáleného pohybu otočného stolu	$[s]$
t_{tot}	Doba, za kterou stůl změnil orientaci snímaného objektu	$[s]$
v	Váha významnosti	$[-]$
A	Podpora A (ložisko 61811)	
B	Podpora B (ložisko 61907)	

Fakulta strojní		Katedra robotiky
B_l	Průměr vnitřního kroužku ložiska	$[mm]$
C_1	Část senzoru doby měření letu světla ve fázi s intervalem záření	
C_2	Část senzoru doby měření letu světla posunutá vůči intervalu záření	
C_r	Radiální základní dynamická únosnost	$[N]$
C_{or}	Radiální základní statická únosnost	$[N]$
D	Průměr vnitřního kroužku ložiska	$[mm]$
F_r	Radiální zatížení ložiska	$[N]$
F_a	Axiální zatížení ložiska	$[N]$
F_x	Síly působící ve směru osy x	$[N]$
F_y	Síly působící ve směru osy y	$[N]$
G	Tíhový účinek skenovaného objektu	$[N]$
H_{max}	Maximální délka statoru krokového motoru	$[mm]$
I_c	Celkový proudový odběr	$[A]$
J_c	Moment setrvačnosti všech rotujících hmot stolu	$[kg \cdot mm^2]$
J_M	Moment setrvačnosti rotoru krokového motoru	$[kg \cdot mm^2]$
J_S	Moment setrvačnosti stolu a snímaného objektu	$[kg \cdot mm^2]$
M_a	Dynamický moment	$[N \cdot mm]$
M_B	Moment vůči reakci B	$[N \cdot mm]$
M_{kl}	Klopný moment od skenovaného tělesa	$[N \cdot mm]$
M_k	Potřebný kroutící moment motoru	$[N \cdot m]$
M_t	Celkový třecí moment ložisek	$[N \cdot mm]$
M_{t1}	Třecí moment ložiska 61811	$[N \cdot mm]$
M_{t2}	Třecí moment ložiska 61907	$[N \cdot mm]$
M_V	Zvolený maximální kroutící moment krokového motoru	$[N \cdot m]$
P	Potřebný výkon napájecího zdroje	$[W]$
P_C	Potřebný počet snímků na jednu otáčku	$[-]$
P_{or}	Radiální ekvivalentní statické zatížení	$[N]$
P_r	Radiální ekvivalentní dynamické zatížení	$[N]$
Q_1	Primární elektrický náboj, metoda měření doby letu světla	$[C]$

Fakulta strojní		Katedra robotiky
Q_2	Sekundární elektrický náboj, metoda měření doby letu světla	[C]
R_{Ax}	Reakce v radiálním směru na podpoře A	[N]
R_{Ay}	Reakce v axiálním směru na podpoře A	[N]
R_{Bx}	Reakce v radiálním směru na podpoře B	[N]
T	Baseline, vzdálenost kamer systému stereovidění	[mm]
Z	Vzdálenost snímaného objektu, metoda stereovidění	[mm]
α_{max}	Maximální úhlové zrychlení stolu	[rad · s ⁻²]
Δt	Časový interval záření, metoda měření doby letu světla	[s]
μ	Konstantní součinitel tření pro daný typ ložiska	[–]
φ_{Δ}	Úhlová dráha stolu uražená mezi jednotlivými snímky	[rad]

Seznam obrázků

Obr 1.1 – Dokumentace historických artefaktů [2].....	18
Obr 1.2 – Taxonomie metod používaných pro získání hloubkových map [3][4][5].....	19
Obr 1.3 – Měřicí hlava Renishaw [8].....	21
Obr 1.4 - Vlevo: Kombinace m. hlavy Renishaw a skeneru KREON [11], Vpravo: ramenový CMM společnosti FARO [12]	21
Obr 1.5 - Vlevo: měření pomocí trackeru C-track a HandyPOBE NEXT, Vpravo: HandyPROBE NEXT a referenční terče [14].....	22
Obr 1.6 - Popis výpočtu: T-baseline, f-fokální vzdálenost, $d=x-x''$ -disparita, Z-hledaná vzdálenost [17].....	23
Obr 1.7 - 2K stereo kamera ZED2	24
Obr 1.8 - Pořizování fotografií pro následnou rekonstrukci [21].....	25
Obr 1.9 – Princip aktivní triangulace laserového skeneru [22].....	25
Obr 1.10 - Laserový skener Leica T-Scan 5, pozice skeneru je definována trackerem Leica Absolute Tracker AT960 [23].....	26
Obr 1.11 - Princip metody využívající strukturované světlo [24].....	26
Obr 1.12 - AICON SmartScan skener společnosti HEXAGON [25]	27
Obr 1.13 - Příklad využití metody strukturovaného světla v herním průmyslu: Kinect pro Xbox 360 [26].....	27
Obr 1.14 - Příklad skeneru s LED zdrojem modulovaného světla Kinect pro Xbox One [26].....	28
Obr 1.15 - Vlevo: princip fungování systému LiDAR [29], Vpravo: Skener FocusS společnosti FARO [30]	28
Obr 1.16 – Princip Michelsonova interferometru [31]	29
Obr 1.17 – Schéma využití optického trackeru a dotykové sondy [32]	29
Obr 1.18 - Princip fungování optického trackeru [32]	30
Obr 1.19 - Leica Absolute Tracker AT960 [33].....	31
Obr 1.20 - Hloubková mapa reprezentovaná mračnem bodů – ze snímku lze vydedukovat pozici skeneru (Kinect 360). Snímek pochází z prostředí Meshlab [34]	32

Obr 1.21 - Detail trojúhelníkové sítě vytvořené z hloubkové mapy na Obr. 1.22. Pro tvorbu trojúhelníkové sítě zde byla použita metoda Poisson surface reconstruction algorithm, Meshlab [34]	32
Obr 2.1 - Skutečné rozměry snímaného referenčního tělesa, PTC Creo.....	34
Obr 2.2 - Vlevo: model získaný pomocí Skenect [39], Vpravo: stejný model po redukci počtu trojúhelníků, Meshlab [34].....	36
Obr 2.3 - Model získaný pomocí SCENE Capture [40], v Meshlabu [34] bylo upraveno měřítko a změřeny délky stran.....	37
Obr 2.4 - Vlevo: model vázy získaný pomocí Skanect [39], Vpravo: stejné těleso, program SCENE Capture [40]	38
Obr 2.5 - Při snímání velkých objektů ale Kinect 360 podává vzhledem ke své ceně výborné výsledky, model získaný pomocí programu Skanect [39].....	38
Obr 2.6 - Příprava referenčního objektu a následná úprava pozadí v editoru GIMP [41]	39
Obr 2.7 - Výsledný model získaný z MVE [42], v Meshlab [34] bylo upraveno měřítko a změřeny délky stran	40
Obr 2.8 - Úprava pozadí snímku vázy pomocí editoru GIMP [41].....	41
Obr 2.9 - Model získaný pomocí MVE [42], trojúhelníková síť upravena pomocí Meshlab [34]	41
Obr 4.1 - Varianta A.....	43
Obr 4.2 - Řez rotačním stolem, varianta A	44
Obr 4.3 - Popis stavu mobilního telefonu	44
Obr 4.4 - Varianta B.....	46
Obr 4.5 - Naklopitelný rotační stůl, varianta B	46
Obr 4.6 - Řez naklopitelným stolem, varianta B.....	47
Obr 4.7 - Varianta C	49
Obr 4.8 - Popis varianty C.....	50
Obr 4.9 - Varianta D.....	52
Obr 4.10 - Popis varianty D	53
Obr 6.1 – Schéma kritického zatížení stolu.....	58
Obr 6.2 – Schéma výpočtu reakcí	59

Obr 8.1 – Příručka MAXON, symetrický profil pohybu [57].....	64
Obr 8.2 – Určení momentu setrvačnosti všech rotujících hmot pomocí SW PTC Creo	65
Obr 9.1 - 17HS2408 [60].....	67
Obr 9.2 – MP6500 [61]	68
Obr 9.3 – Arduino Nano [62]	68
Obr 9.4 - HC-05 Bluetooth Modul [65]	69
Obr 9.5 – Napaájecí adaptér Vigan [66]	69
Obr 9.6 - JACK 5,5 x 2,1mm [67]	70
Obr 9.7 – Mikrospínač 6x6x10mm [68].....	70
Obr 9.8 - DC Barrel Jack Adapter [69]	70
Obr 9.9 - Elektrolytický kondenzátor [70]	71
Obr 9.10 - Metalizovaný rezistor RM 1k [71]	71
Obr 9.11 - Metalizovaný rezistor RM 2k[72]	71
Obr 9.12 - Metalizovaný rezistor RM 10k [73]	71
Obr 9.13 - Cuprextit 120x80x1,5 jednovrstvý [74].....	71
Obr 10.1 – Schéma zapojení elektrického obvodu.....	72
Obr 11.1 – Popis rozpracování rotačního stolu	73
Obr 11.2 – Popis úprav stativu	74
Obr 12.1 – PrusaSlicer byl využit vyjádření spotřeby filamentu [78]	76

Seznam tabulek

Tabulka 1 - Vyhodnocení odchylek rozměrů modelu získaného pomocí Kinectu 360	37
Tabulka 2 - Vyhodnocení odchylek rozměrů modelu získaného fotogrammetrií.....	40
Tabulka 3 – Parametry varianty A	45
Tabulka 4 - Parametry varianty B	48
Tabulka 5 - Parametry varianty C	51
Tabulka 6 – Parametry varianty D	54
Tabulka 7 – Souhrn hodnocených kritérií	55
Tabulka 8 – Způsob hodnocení úrovně plnění jednotlivých kritérií	55
Tabulka 9 – Způsob hodnocení významnosti jednotlivých kritérií.....	55
Tabulka 10 – Metoda porovnání v trojúhelníku párů.....	56
Tabulka 11 – Souhrn hodnot kritérií pro jednotlivé varianty	56
Tabulka 12 – Porovnání variant	57
Tabulka 13 – Výchozí hodnoty pro výpočet reakcí	59
Tabulka 14 – Parametry ložiska 61811	61
Tabulka 15 – Parametry ložiska 61811	62
Tabulka 16 – Výchozí parametry pro výběr krokového motoru.....	67
Tabulka 17 – Potřebný napájecí výkon komponent	69
Tabulka 18 – Náklady spojené s 3D tiskem	75
Tabulka 19 – Seznam nakupovaných komponent.....	75

Úvod

Na základě zadání a konzultace s vedoucím bakalářské práce byl za cíl určen konstrukční návrh cenově dostupného 3D skenovacího systému, který pro snímání objektů využívá otočný stůl a nebo otočné rameno se snímacím zařízením. Většina dílů konstrukce bude vyrobena pomocí 3D tisku. Takto navržený 3D skenovací systém by se mohl stát pro majitele 3D tiskáren jednoduše dostupným způsobem jak získat přístup k řadě nových modelů pro 3D tisk.

Nejprve bude provedena analýza metod 3D skenování, součástí analýzy bude také praktická zkouška několika skenovacích metod. Na základě získaných znalostí bude vybrána nejvhodnější a nejdostupnější skenovací technologie. Dále bude sepsán požadavkový list, dle jehož instrukcí bude navrženo několik konstrukčních variant skenovacího systému. Pomocí kritériální analýzy bude vybrána optimální varianta. Ta bude dále zpracována do podoby detailního modelu, podloženého technickou dokumentací.

1 Analýza současného stavu 3D skenování

Proces 3D skenování je analýza a sběr dat popisujících tvar a rozměry snímaného objektu nebo prostředí. Shromážděná data pak mohou být použita pro konstrukci digitálních 3D modelů. Zařízení, která tento proces umožňují, nazýváme 3D skenery nebo 3D digitizéry. V současné době můžeme tento druh zařízení označit za již dobře ověřený a často používaný nástroj, který nachází uplatnění v řadě odvětví. V oblasti průmyslu patří mezi nejčastější aplikace tvorba CAD modelů podle již existujících výrobků (reverzní inženýrství), měření odchylek rozměrů výrobku a výrobního CAD modelu (kontrola kvality) nebo zabezpečení robotizovaných pracovišť [1]. Dále jsou 3D skenery využívány při výrobě protetických pomůcek, mapování terénu nebo řízení autonomních vozidel. Kromě těchto zavedených aplikací se získávání trojrozměrného obrazu tělesa využívá také při tvorbě filmů a her k snímání pohybu. Často jsou touto cestou dokumentována archeologická naleziště a kulturní artefakty [2].



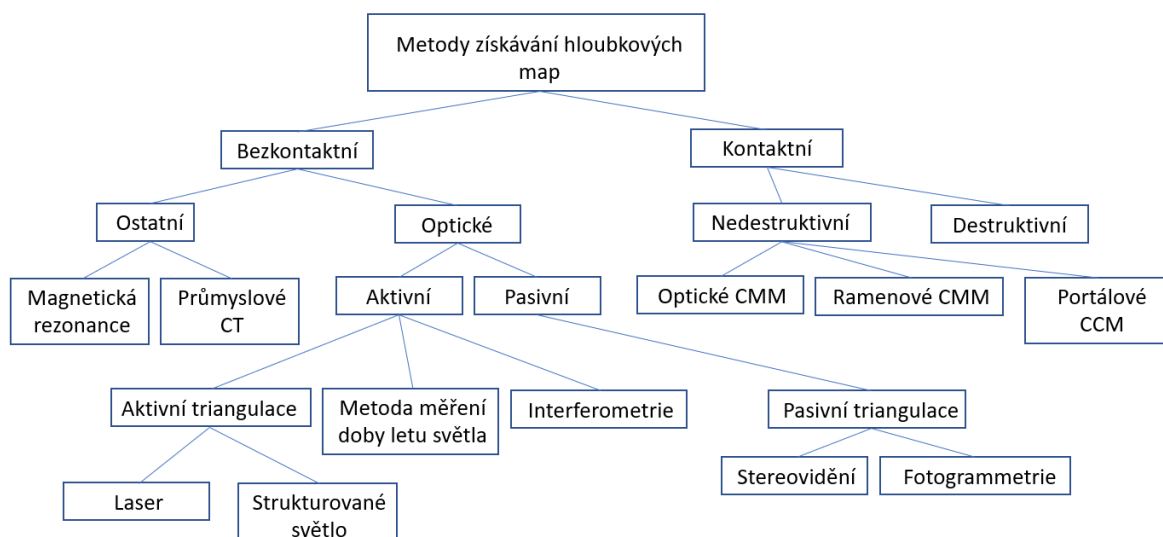
Obr 1.1 – Dokumentace historických artefaktů [2]

3D skener může pracovat na základě různých technologií, kdy každá má svá vlastní omezení, výhody a náklady. Stále existuje mnoho omezení v druhu objektů, které lze digitalizovat.

V následující analýze budou nejprve popsány jednotlivé technologie, které 3D skenery využívají pro získání trojrozměrných dat, tzv. hloubkových map. U každé technologie bude uveden příklad 3D skeneru využívaného v praxi. Následně popíšu proces, během kterého jsou data získaná 3D skenováním převedena na formát použitelný pro většinu CAD/CAM software, 3D tisk a jiné aplikace. Poté se zaměřím na kombinace 3D skenerů s rotačními stoly, které se dnes na trhu nachází.

1.1 Rozdělení 3D skenerů

Princip fungování většiny 3D skenerů je založen na zapisování informací o vzdálenosti bodů ležících uvnitř nebo na povrchu všech objektů, které se nachází v pracovním poli skeneru. Díky této informaci můžeme identifikovat trojrozměrnou polohu každého bodu vzhledem k danému souřadnému systému, výsledkem je tzv. hloubková mapa (z angl. range map). Pro získání kompletního modelu tělesa je zapotřebí provést více snímání z několika stran a získané hloubkové mapy následně spojit v jeden prostorový obraz [3]. V této kapitole ale bude věnována pozornost rozdělení používaných metod pro získání informace o vzdálenosti snímaných bodů. Celkový výčet technologií, které se pro tento účel využívají, je značně rozsáhlý a níže uvedená taxonomie obsahuje pouze jeho část. Přesto však v tomto souhrnu nalezneme většinu metod, které jsou v praxi nejčastěji využívány.



Obr 1.2 – Taxonomie metod používaných pro získání hloubkových map [3][4][5]

Většinou se tyto metody dělí na kontaktní a bezkontaktní. Bezkontaktní metody se dále dělí na optické a ostatní. Optické metody zaznamenaly během posledních desetiletí překotný rozvoj a díky stále se zlepšující rychlosti měření, přesnosti a dostupnosti pomalu nahrazují v průmyslu tradičně zastoupené kontaktní měřící metody [6].

1.2 Kontaktní metody destruktivní

1.2.1 Automated Cross Sectional Scanning

Tato metoda se nachází zejména v oblasti reverzního inženýrství při digitalizaci součástí se složitou vnitřní geometrií. Nevýhoda této metody spočívá ve zničení snímaného objektu. Postup snímání je následující. Měřený objekt je nejprve zanořen do kontrastní pryskyřice, která časem ztvdne. Veškeré plochy a vnitřní dutiny jsou obaleny a zaplněny kontrastní pryskyřicí. Poté je takto připravený blok upevněn na frézovací stůl. Následně jsou frézováním odebrány tenké vrstvy o tloušťce 0,0127-0,254 mm. Po odfrézování každé vrstvy je nově odkrytý povrch zachycen optickým skenerem, odkud jsou jednotlivé 2D snímky ukládány a řazeny za sebou tak, jak byly odebrány jednotlivé vrstvy objektu. Výstupem je mračno bodů, které může být dále zpracováno a použito k tvorbě trojrozměrného modelu tělesa. Takto získaný model může být využit k porovnání odchylek s výrobním CAD modelem nebo jako vzor pro výrobu formy. Výhodou této metody oproti těm optickým je získání vnitřní geometrie tělesa. Další výhodou oproti optickým skenerům je výstup ve formě jednoho celkového trojrozměrného modelu, takže se během zpracování mračna bodů nemusí řešit spojování jednotlivých hloubkových map. Mezi nevýhody patří velká časová náročnost a malé rozměry skenovaných objektů. Pro níže uvedené zařízení RE1000 jsou maximální rozměry měřeného tělesa 304x266x203mm [7].

1.3 Kontaktní metody nedestruktivní

Kontaktní metody nedestruktivní využívají k měření rozměrů zkoumaného objektu fyzický dotek. Zařízení, která pracují na základě této metody, se nazývají souřadnicové měřicí stroje (z angl. CMM-coordinate measuring machine). Dotek je realizován skrze rubínovou kuličku měřicí hlavy, ta při dotyku vyše elektrický impuls řídící jednotce k zapsání její polohy. Poloha měřicí hlavy je definována vůči výchozímu souřadnému systému na základě vychýlení jednotlivých pracovních os CMM. Naměřená data mohou být získána skrze jednotlivé doteky nebo pomocí tažení kuličky měřicí hlavy po povrchu kontrolované součásti. Podle struktury pracovních os jsou v této kapitole rozčleněny jednotlivé typy CMM. Společným rysem těchto zařízení je vysoká přesnost měření a nezávislost na lesklosti a průhlednosti měřeného povrchu. Nevýhodou je, v porovnání s optickými metodami 3D skenování, velká časová náročnost měření. Zařízení, pracující na tomto principu, v praxi stále nachází uplatnění v oblasti kontroly kvality výrobků s přísnými tolerančními předpisy [4].



Obr 1.3 – Měřicí hlava Renishaw [8]

1.3.1 Portálový CMM

Tento typ obsahuje tři navzájem kolmé pracovní osy, které umožňují polohování měřicí hlavy v trojrozměrném kartézském souřadném systému. Navíc je možné naklápět měřicí hlavu, což zlepšuje její dosah. Hodnoty vychýlení jednotlivých os měřené lineárními enkodéry poté jednoznačně definují polohu měřicí hlavy, tedy bodu na povrchu měřené součásti. Konstrukce tohoto zařízení je tvořena portálem ze slitiny hliníku, žulovým stolem a vertikálně stavitelnou pinolou, na kterou je připevněna měřicí hlava. Měření může probíhat v manuálním nebo automatickém režimu. Kdy lze pro často se opakující měření identických objektů naprogramovat CMM na danou úlohu [9]. Díky časové náročnosti této metody je v současnosti, za účelem urychlení měřicího procesu měřicí hlava CMM doplněna o optický skener. Kombinace fyzického doteku a bezdotykového snímání se v praxi osvědčila jako velice efektivní postup (v angl. multi-sensor inspection). Kontaktní metoda totiž zajistí kontrolu částí výrobku s menšími tolerancemi a bezkontaktní metoda velice rychle změří prvky s širšími tolerančními poli a zachytí tak celkovou geometrii výrobku [10].

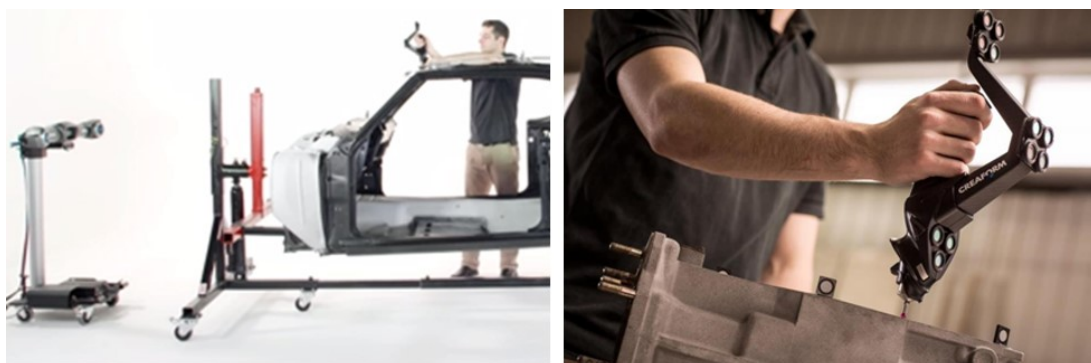
Ramenový CMM (v angl. AACMM – articulated arm CMM) je typ souřadnicového měřicího stroje, který pro určení polohy měřicí hlavy používá rotační enkodéry uložené v pracovních osách stroje. Většinou je pracovních os šest až sedm. Systém je přenosný, lehký a dosah měřicí hlavy je větší než u portálového CMM. Kontaktní měřicí hlavu je opět možné kombinovat s optickými skenery. A ačkoli je poloha měřicí hlavy ovládána manuálně operátorem a dosažená přesnost je zde oproti portálovému CMM menší, je toto zařízení v oblasti reverzního inženýrství a kontroly kvality často používanou pomůckou [9].



Obr 1.4 - Vlevo: Kombinace m. hlavy Renishaw a skeneru KREON [11], Vpravo: ramenový CMM společnosti FARO [12]

1.3.2 Optický CMM

Měřicí hlava, zajišťující kontakt s povrchem měřené součásti, je opatřena retroreflektorem. Což je zařízení, které vždy odráží dopadající paprsky zpět k jejich zdroji. Zdrojem je laserový tracker, který na základě odražených paprsků určuje polohu retroreflektoru. Poloha je definována informacemi ze dvou rotačních enkodérů v otočné hlavě laser trackeru a vzdáleností retroreflektoru vyjádřenou pomocí laserové interferometrie nebo technologie ADM (z angl. absolute distance meter) [13]. Dalším způsobem určení polohy měřicí hlavice je tracker C-track firmy Creaform, využívající dvou kamer a minimálně 4 referenčních terčů připojených k měřenému objektu. Tento systém vytvoří kolem objektu referenční klec, takže lze v průběhu měření volně pohybovat se trackerem i s měřicí hlavou (v případě této firmy se jedná o HandyPROBE NEXT). Měřicí hlava má tedy neomezený počet stupňů volnosti a pomocí této metody lze kontrolovat objekty značných rozměrů [14].



Obr 1.5 - Vlevo: měření pomocí trackeru C-track a HandyPOBE NEXT, Vpravo: HandyPROBE NEXT a referenční terče [14]

1.4 Bezkontaktní metody ostatní

1.4.1 Průmyslové CT

Výpočtová tomografie slouží v průmyslu k zjišťování skrytých vad materiálu a ke kontrole rozměrů částí, které jsou pro ostatní metody nedostupné. Jedná se hlavně o kontrolu elektronických sestav, těsnosti svarů, tloušťky a pórovitosti stěn odlitků. Využívá se také v lékařství. CT může být také využito v oblasti reverzního inženýrství pro tvorbu trojrozměrného CAD modelu. Metoda je založena na skládání jednotlivých 2D rentgenových snímků objektu do 3D modelu. V praxi se můžeme setkat se dvěma způsoby snímání. Většinou je zdroj záření statický a rotuje objekt měření. Tato metoda je časově náročná, protože vyžaduje velice přesné a pevné upnutí objektu do žulového manipulačního systému. Časově efektivnější je postup, kdy na dopravníku uložený obrobek projíždí průmyslovým CT a kolem něj rotuje zdroj záření. Měření dokáže pracovat v taktu dvou minut a tok dílů není narušen. Tento princip je převzat z lékařského CT [15].

1.4.2 Magnetická rezonance

Zobrazovací metoda používaná především ve zdravotnictví k zobrazení vnitřních orgánů. Uplatnění ale nachází také v průmyslu a farmacii. Využívá silného magnetického pole a elektromagnetického vlnění. Takže oproti CT nevyzařuje žádné škodlivé záření [16].

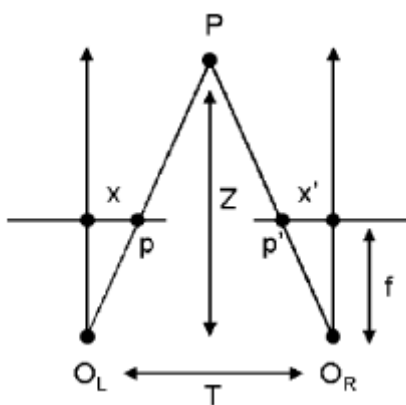
1.5 Bezkontaktní metody optické

Tyto metody využívají k měření rozměrů a geometrie snímaných těles světelné záření. Podle zdroje záření se dále dělí na metody aktivní a pasivní. Aktivní metody pracují se zářením emitovaným vlastním zdrojem skeneru (aktivní triangulace, doba letu světla, interferometrie). Pasivní metody využívají okolní světlo (pasivní triangulace) [5].

Bezkontaktní metody se vyznačují velkou rychlostí snímání. Nevýhodou je obtížné skenování lesklých, černých a průhledných objektů. To ale lze vyřešit nástřikem zmatňujících prášků. Pasivní metody dále špatně snímají objekty s jednotným a jednobarevným povrchem, poněvadž je zde nedostatek referenčních bodů pro rozpoznání odpovídajících si bodů (viz stereovidění a fotogrametrie).

1.5.1 Stereovidění (pasivní triangulace)

Jedná se o pasivní optickou metodu, pracuje tedy pouze se zářením odraženým z okolí. Systém se skládá ze dvou snímačů (kamer), které snímají stejnou scénu, ale z rozdílných pozic. Jejich pozice spojuje úsečka (baseline) o známé velikosti. Obraz z obou kamer je porovnán a pomocí algoritmů je každému pixelu obrazu první kamery přiřazen odpovídající pixel z obrazu pořízeného druhou kamerou. Poté je určena odchylka těchto vzájemně si odpovídajících pixelů (tzv disparita). Na základě disparity jednotlivých pixelů, velikosti baseline a fokální vzdálenosti kamer je vypočtena hloubková mapa snímané scény (pasivní triangulace) viz. vztah (1).



Obr 1.6 – Popis výpočtu: T-baseline, f-fokální vzdálenost, $d=x-x'$ -disparita, Z-hledaná vzdálenost [17]

$$Z = f \cdot \frac{T}{d} \quad (1)$$

Celý proces přiřazování vzájemně si odpovídajících pixelů je značně náročný na výpočetní výkon. Proto bylo snímání v reálném čase, které vyžaduje minimální

snímkovou frekvenci 30fps, po dlouhou dobu nedostupné. To se ale díky rozvoji výpočetní techniky změnilo a stereo snímání je dnes dostupnou a kompaktní metodou, která nachází řadu uplatnění [17]. Přesto se ale přesností nevyrovná metodám využívajícím laser a strukturované světlo.

Uplatnění nachází při navigaci autonomních robotů nebo při určování polohy skeneru, potřebné pro napojení jednotlivých hloubkových map [1].



Obr 1.7 - 2K stereo kamera ZED2

1.5.2 Fotogrammetrie (pasivní triangulace)

Fotogrammetrie je pasivní optická metoda, která využívá pro vytvoření trojrozměrného modelu fotografie. Je nutné, aby na fotografiích byly zachyceny všechny prvky snímaného objektu, a aby se sousední fotografie překrývaly. Soubor fotografií je poté zpracován v softwaru, například free, open-source MESHROOM/Alice Vision. Tento software umožňuje rekonstrukci tělesa v reálném čase, takže je možné postupně nahrávat chybějící fotografie a doplňovat tak nedefinované části modelu [19]. Software na základě překrytí fotografií vyhledá referenční body a spojí sousední fotografie. Poté na základě podobného principu, jaký využívá stereovidění (pasivní triangulace), software přiřadí každému nasnímanému bodu jeho pozici. Vznikne tak mračno bodů, které je již zpracováno obvyklým způsobem. Tato metoda tedy vyžaduje fotoaparát (lze použít i mobilní telefon), software a počítač. Nevýhodou této metody je (při použití jednoho fotoaparátu) velká časová náročnost a přesnost ovlivněná rozlišením použitého snímacího zařízení. Existují však také přístroje využívající více fotoaparátů najednou. Přesnost je zde ale většinou lepší než u stereovidění. Další nevýhodou je obtížné snímání souvislých a jednobarevných povrchů, poněvadž tyto povrchy neposkytují dostatek referenčních bodů. To lze ale vyřešit nakreslením značek na snímaný povrch. Výhodou jsou prakticky nulové náklady a zachycení barvy snímaného povrchu.

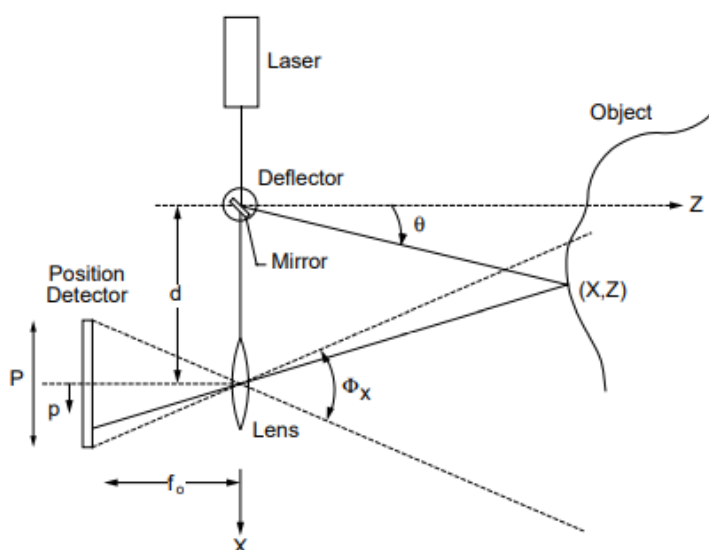


Obr 1.8 - Pořizování fotografií pro následnou rekonstrukci [21]

Díky tomu je tato metoda často využívána v neprofesionálním sektoru pro získání modelů v oblasti 3D tisku [20].

1.5.3 Laser (aktivní triangulace)

Tato metoda je určena pro velice přesná měření na menší vzdálenosti. Princip měření je zobrazen na Obr 1.9. Probíhá tak, že koherentní světelný paprsek generovaný laserovým zdrojem je promítán na povrch snímaného tělesa. Jedna nebo více kamer, skládajících se z čočky a pozičního čidla, snímají pozici obrazu promítaného laserového paprsku na povrchu tělesa. Výpočet souřadnic snímaného bodu vychází ze známé vzdálenosti zdroje laserového paprsku a kamery. Dále je znám úhel, pod kterým je paprsek vyzařován, a během snímání je následně vyhodnocován úhel, pod jakým paprsek dopadá na kameru. Velikost neměnných parametrů systému by měla být v rozestupu určitých intervalů pravidelně upřesňována na základě kalibrace. Z důvodu urychlení tohoto procesu je na těleso promítána přímka nebo kombinace přímek.



Obr 1.9 – Princip aktivní triangulace laserového skeneru [22]

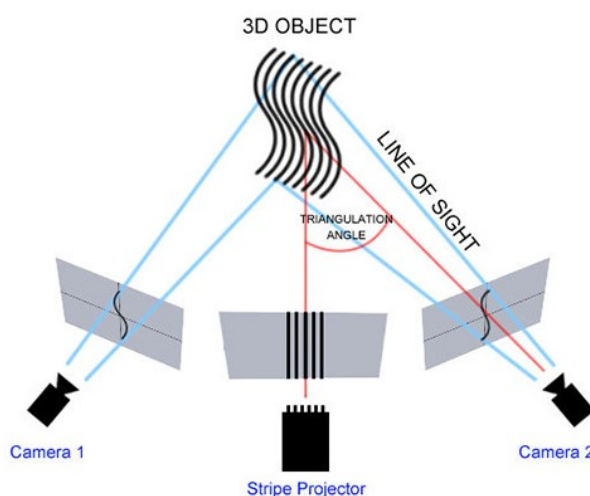
Tyto skenery jsou díky své vysoké přesnosti používány v průmyslu, kde často v kombinaci s kontaktními sondami urychlují měření souřadnicových měřicích strojů. Existují také provedení, která jsou umísťována na průmyslové roboty nebo jsou ovládána ručně [22].



Obr 1.10 - Laserový skener Leica T-Scan 5, pozice skeneru je definována trackerem Leica Absolute Tracker AT960 [23]

1.5.4 Strukturované světlo (aktivní triangulace)

Snímací systém se skládá z projektoru a dvou kamer se stejnou fokální vzdáleností. Na povrch objektu jsou promítány geometrické obrazce (většinou pravidelně se střídající pruhy), které se deformují podle snímaného povrchu. Kamery tuto deformaci snímají a na základě triangulace, která vychází ze vzájemné pozice kamer a projektoru, určí trojrozměrnou polohu bodů snímaného povrchu. Na rozdíl od přechodí metody, kdy byly během jednoho snímku zpracovány pouze body ležící na laserem specifikované čáře. Tato metoda zpracovává všechny body nacházející se v zorném poli kamer, při čemž dokáže zachytit až jeden milion bodů během jednoho snímku.



Obr 1.11 - Princip metody využívající strukturované světlo [24]

Díky použití dvou kamer je možné spojovat jednotlivé snímky pomocí metody stereovidění. Metoda strukturovaného světla se vyznačuje velkou přesností, zejména pokud

pracuje s malými objekty. Se zvětšující se vzdáleností snímaného povrchu klesá ostrost promítaných obrazců a tím i přesnost získaného obrazu. Přesnost je dále negativně ovlivněna okolním osvětlením. Skenery pracující s bílým světlem totiž nedokáží rozeznat promítané a okolní osvětlení, čímž dochází ke zkreslení výsledků. Situaci částečně řeší skenery využívající modré světlo, které je jednodušeji rozeznatelné od okolního světla. Projektory využívající modré světlo navíc pracují při nižší teplotě a snižují tak vliv teplotní roztažnosti na výsledné měření [6].



Obr 1.12 - AICON SmartScan skener společnosti HEXAGON [25]



Obr 1.13 - Příklad využití metody strukturovaného světla v herním průmyslu: Kinect pro Xbox 360 [26]

1.5.5 Metoda měření doby letu světla

Zjednodušeně lze princip této metody popsat jako určování vzdálenosti bodů na základě známé rychlosti světla $c = 300 \cdot 10^6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ a určené doby, za kterou se paprsek odrazí od zkoumaného povrchu zpět ke skeneru. Přímé měření této doby ale při zachování přesnosti klade velké nároky na výkon měřících zařízení. Proto se pro určení doby letu používá metoda modulovaného světla.

Skener se skládá ze zdroje pulzně nebo spojitě modulovaného světla (laser nebo LED) a senzoru (CCD/CMOS) schopného detekovat fázi dopadajícího světla. Pulzní modulace světla je vytvářena skrze velice rychlé přerušování zdroje světla. Měření vzdálenosti bodů zkoumaného povrchu je založeno na základě fázového posunu vyzařovaného světla a dopadajícího světla na senzor. Zdroj světla během krátkých intervalů Δt střídavě spíná a vypíná. Tyto pulzy světla po odražení od snímaného objektu dopadají zpět na povrch senzoru s fází posunutou vůči zdroji o dobu letu. Senzor je rozdělen na dvě stejné části C_1 a C_2 , které

v intervalech Δt přerušovaně snímají dopadající záření. Jedna část je ve fázi se zdrojem, druhá je proti němu posunuta o Δt . Na základě elektrického náboje Q_1 generovaného v první části C_1 a náboje Q_2 druhé části C_2 je vypočtena doba letu t a z ní vzdálenost d snímaného objektu, viz vztah (2,3) [27].

$$d' = \frac{1}{2} \cdot c \cdot \Delta t \cdot \left(\frac{Q_2}{Q_1 + Q_2} \right) [m] \quad (2)$$

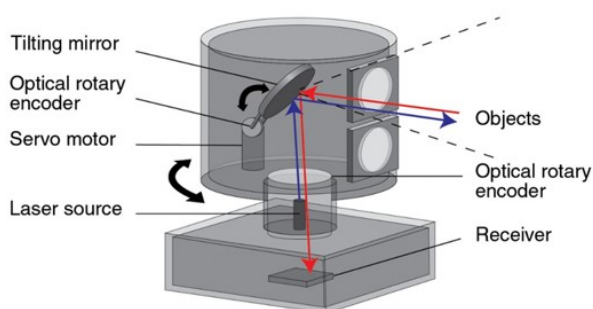
$$d' = \frac{1}{2} \cdot c \cdot t [m] \quad (3)$$

Skenery s LED zdrojem snímají celé zorné pole najednou a neobsahují žádné pohyblivé části. Oproti laserovým zdrojům ale pracují na kratší vzdálenosti [28].



Obr 1.14 - Příklad skeneru s LED zdrojem modulovaného světla Kinect pro Xbox One [26]

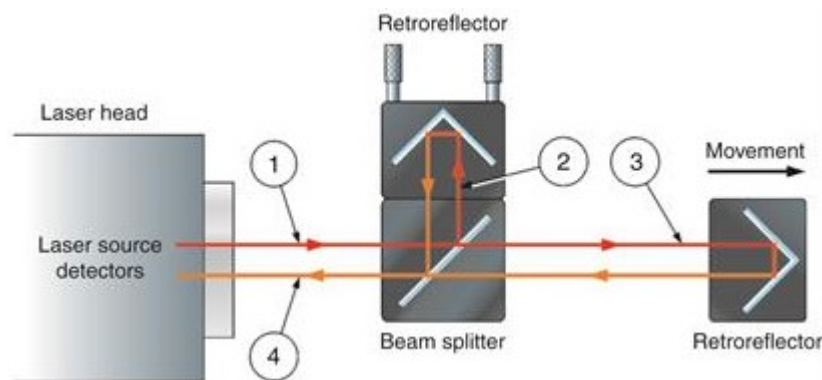
Skenery snímající více vzdálené objekty využívají laser a označují se LiDAR (z angl. Light Detection and Ranging). Pro získání většího zorného pole je nutné měnit orientaci laserového paprsku. Vertikální pohyb paprsku zajišťuje naklopitelné zrcátko. Horizontální přemisťování paprsku pak zajišťuje rotace celého skeneru. Jak vertikální naklápění zrcátka, tak rotace celého skeneru je zaznamenávána rotačními enkodéry, které poskytují, pro jednotlivá měření doby letu světla, informace o orientaci paprsku. Výsledkem je mračno bodů. Za účelem dostatečného rozlišení dosahují rotující díly až 1000 ot/min. s přesností na 120 metrů menší jak 2cm. LiDAR zařízení jsou využívána pro vytváření digitální map, zabezpečení robotizovaných pracovišť nebo řízení autonomních vozidel [29].



Obr 1.15 - Vlevo: princip fungování systému LiDAR [29], Vpravo: Skener FocusS společnosti FARO [30]

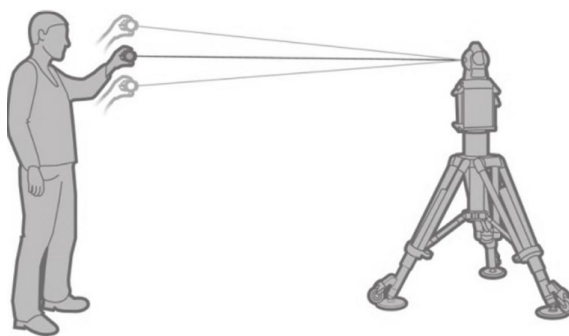
1.5.6 Interferometrie

Měření vzdálenosti pomocí interferometrie funguje na principu Michelsonova interferometru. Laserový paprsek (1) je na děliči rozštěpen na dva paprsky, referenční (2) a měřicí (3). Tyto paprsky jsou dvěma retroreflektory nasměrovány zpět na dělič paprsku, kde se spojí a dopadnou na detektor (4).



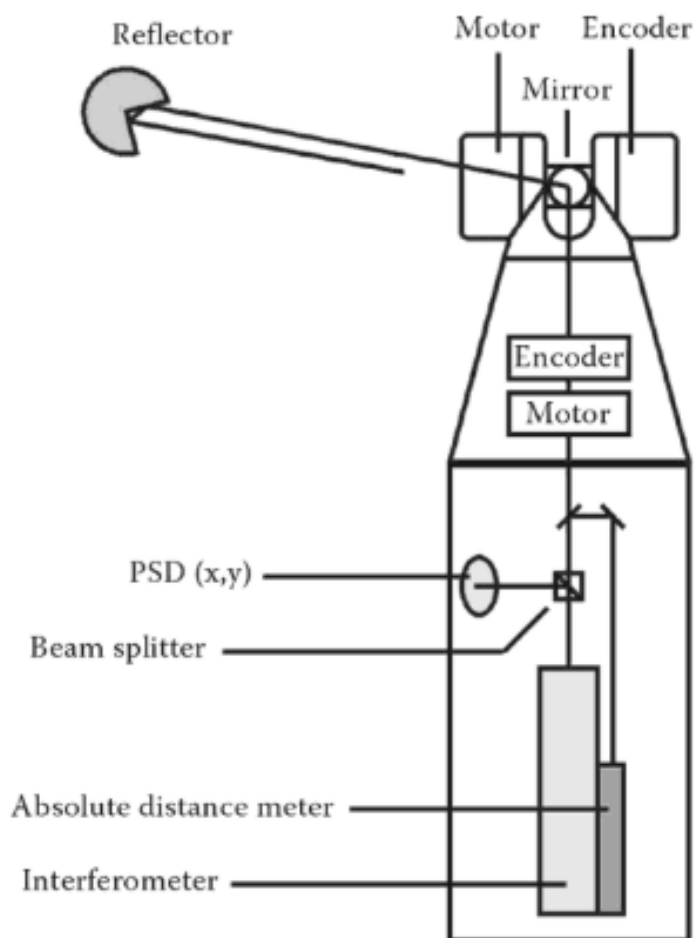
Obr 1.16 – Princip Michelsonova interferometru [31]

Díky rozdílným drahám obou paprsků vzniká jejich fázový posun. Tento fázový posun vytváří mezi původně identickými vlnami interferenční obrazec, který je identifikován detektorem. Při konstruktivní interferenci jsou oba paprsky ve fázi, jejich amplitudy se vzájemně podporují a vznikají jasné pruhy. Při destruktivní interferenci se amplitudy vzájemně ruší a vznikají tmavé pruhy. Detektor tyto změny intenzity dopadajícího světla snímá a převádí na digitální signál. Při zvětšování vzdálenosti, kterou měřicí paprsek musí urazit, dochází k cyklickému opakování konstruktivní a destruktivní interference. K opakování cyklu dochází vždy, kdy se retroreflektor měřicího paprsku posune o polovinu vlnové délky laseru. Přesnost měření vzdálenosti je tedy závislá na tom, s jakou určitostí známe vlnovou délku laseru. Vzdálenost je tedy měřena relativně, pomocí počtu cyklů. Velikost vlnové délky závisí na indexu lomu vzduchu, jímž paprsek prochází, a mění se s teplotou, tlakem a relativní vlhkostí vzduchu. Proto je nutné na základě těchto parametrů před každým měřením definovat aktuální velikost vlnové délky [31]. Tato technologie je jednou z nejpresnějších optických metod. Proto nachází uplatnění v optických trackerech, které jsou používány k určování polohy skenerů nebo dotykových sond optických CMM.



Obr 1.17 – Schéma využití optického trackeru a dotykové sondy [32]

Laserový paprsek je pomocí rotačního zrcátka v hlavě trackeru nasměrován na retroreflektor. Odtud se díky dříve popsaným vlastnostem retroreflektoru vrací skrze rotační zrcátko zpět do trackeru.



Obr 1.18 - Princip fungování optického trackeru [32]

Na děliči je paprsek rozdělen na dva paprsky, jeden je určen na interferometrický výpočet vzdálenosti retroreflektoru a druhý je nasměrován na senzor (PSD-position sensing device) určující pozici retroreflektoru. Změny pozice retroreflektoru ve směru paprsku jsou zaznamenány pomocí interferometrie, všechny ostatní pohyby zaznamenává poziční senzor (PSD). Výchyly z nulové pozice na PSD senzoru jsou převáděny na jednotlivé rotační osy hlavy trackeru tak, aby bylo opět dosaženo nulové pozice. Na základě informací z rotačních enkodérů v osách hlavy trackeru a vzdálenosti retroreflektoru určené pomocí interferometrie je určena jeho prostorová pozice. Jelikož interferometrie měří vzdálenost relativně, bylo u starších trackeru nutné pro získání absolutní vzdálenosti vycházet z počátečního bodu souřadného systému. A pokud byl paprsek během měření přerušen, muselo se začít měřit znovu. Dnešní trackery využívají kromě interferometrie také ADM (absolute distance meter), díky čemuž je možné i po přerušení navázat na poslední známou pozici retroreflektoru a pokračovat v měření [32].



Obr 1.19 - Leica Absolute Tracker AT960 [33]

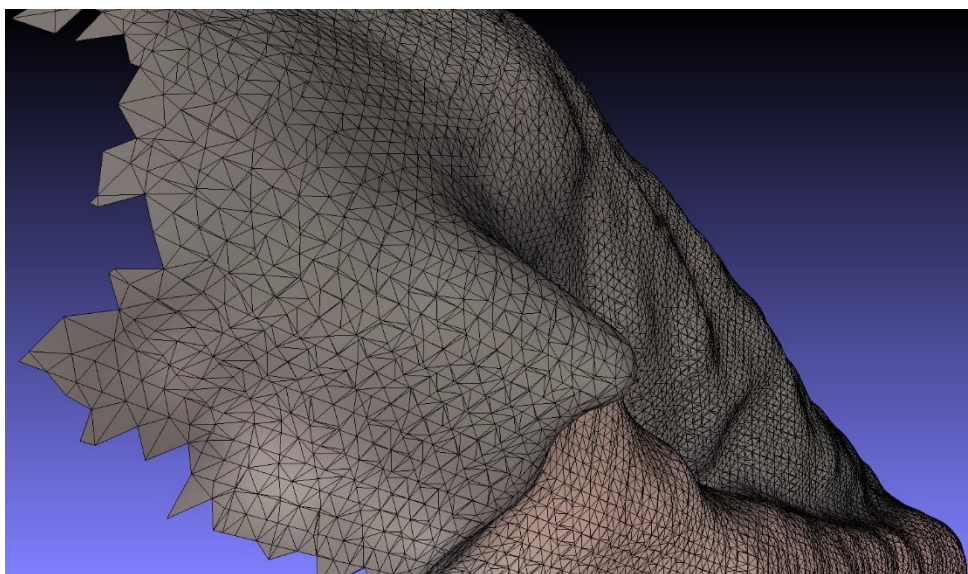
1.6 Postup zpracování mračen bodů

Výstupem výše popsaných metod 3D skenování jsou hloubkové mapy, které reprezentují trojrozměrný obraz snímaného tělesa pomocí mračen bodů. Hloubková mapa představuje jeden snímek 3D skeneru. K vytvoření kompletního modelu je zapotřebí jednotlivé hloubkové mapy vzájemně spojit. Některé metody 3D skenování umožňují spojování hloubkových map již v průběhu skenování, v opačném případě je nutné jednotlivé hloubkové mapy spojit ručně pomocí příslušného softwaru (například Meshlab).



Obr 1.20 - Hloubková mapa reprezentovaná mračenem bodů – ze snímku lze vydedukovat pozici skeneru (Kinect 360). Snímek pochází z prostředí Meshlab [34]

Jakmile jsou hloubkové mapy spojeny a trojrozměrný model reprezentovaný mračenem bodů je kompletní, přichází na řadu tvorba sítě. Tato síť rekonstruuje povrch snímaného tělesa a je generována na základě algoritmu, například Poisson surface reconstruction algorithm pro tvorbu trojúhelníkové sítě [34].



Obr 1.21 - Detail trojúhelníkové sítě vytvořené z hloubkové mapy na Obr. 1.22. Pro tvorbu trojúhelníkové sítě zde byla použita metoda Poisson surface reconstruction algorithm, Meshlab [34]

Model nyní disponuje souvislým povrchem, který ale není zcela v pořádku. Je potřeba odstranit hrany, sdílené více jak dvěma trojúhelníky, izolované plochy, a poté zaplnit otvory. Následuje vyhlazení nerovností a zjednodušení sítě. Snížení počtu trojúhelníků při maximálním zachování tvaru modelu je výhodné zejména při následném 3D tisku [35].

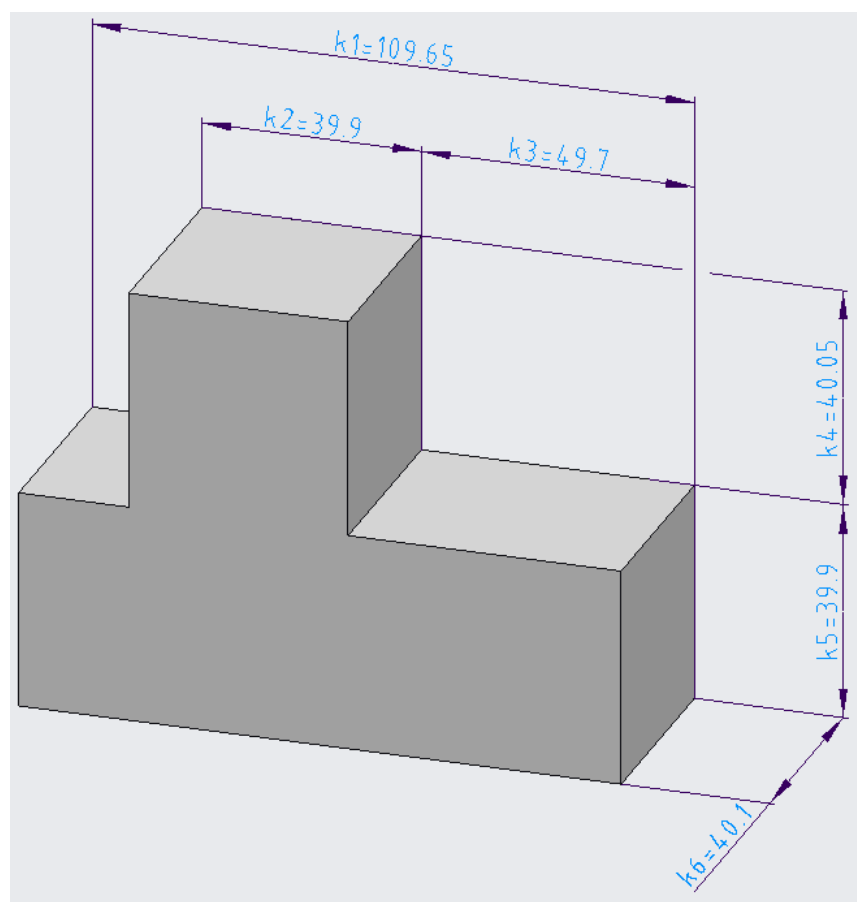
Bezplatný SW:

- Meshlab [34],
- Autodesk Meshmixer [36], nutnost GPU nVidia (CUDA)
- CloudCompare [37]

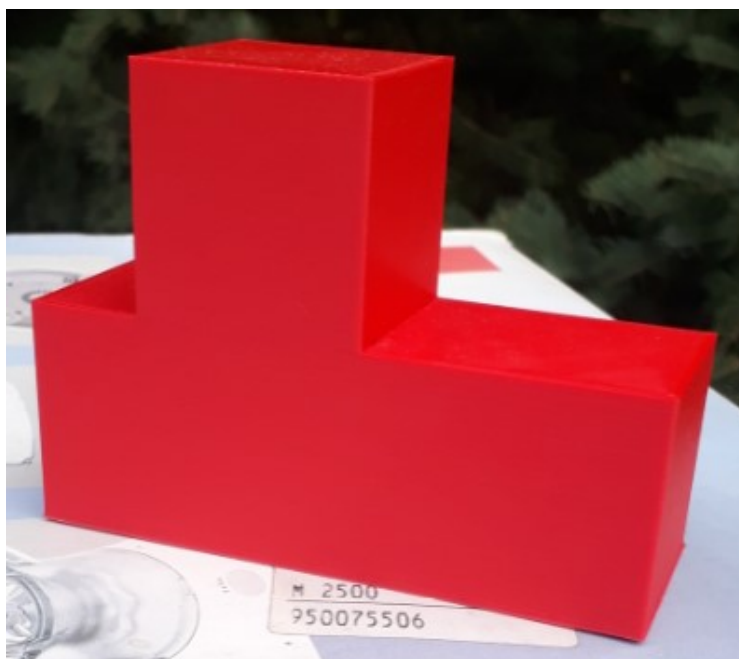
2 Testování cenově dostupných technologií pro 3D skenování

Návrh konstrukce rotačního stolu je značně ovlivněn technologií 3D skenování, která bude při snímání objektů použita. Vzhledem ke snaze navrhnout skenovací systém otočného stolu co nejvíce dostupný, a to maximalizací počtu 3D tištěných dílů a minimalizací nakupovaných komponent, je i volba skenovací technologie zaměřena na cenově dostupná řešení. Proto jsou v této kapitole porovnány parametry Kinectu 360 (metoda strukturovaného světla) a fotogrammetrie. Kromě těchto dvou metod existují i další cenově dostupné technologie 3D skenování. Například laserová aktivní triangulace (viz. kapitola 1.5.3) poskytuje při kombinaci webové kamery a dvou laserových ukazovátek dobrou kvalitu skenování při nízkých pořizovacích nákladech (například skener CICLOP [38]).

Při vypracování této práce se mi ale podařilo otestovat pouze dvě níže pospané metody. Porovnání proběhne na základě ceny a kvality získaných dat. Pro porovnání kvality nasnímaných dat poslouží keramická váza (max, průměr $80 \times 80 \times 120 \text{ mm}$) a referenční těleso (rozměry viz. Obr 2.1) se známými rozměry, které bylo za tímto účelem vytištěno na 3D tiskárně. Během tisku referenčního objektu došlo ke zkreslení skutečných rozměrů oproti zdrojovému CAD modelu. Tuto změnu rozměrů, zobrazenou na Obr. 4.1, je nutné během hodnocení přesnosti vzít v úvahu.



Obr 2.1 - Skutečné rozměry snímaného referenčního tělesa, PTC Creo



Obr. 2.2 – Referenční těleso vyrobené pomocí 3D tisku



Obr. 2.1 – Snímaná keramická váza

2.1 Kinect 360

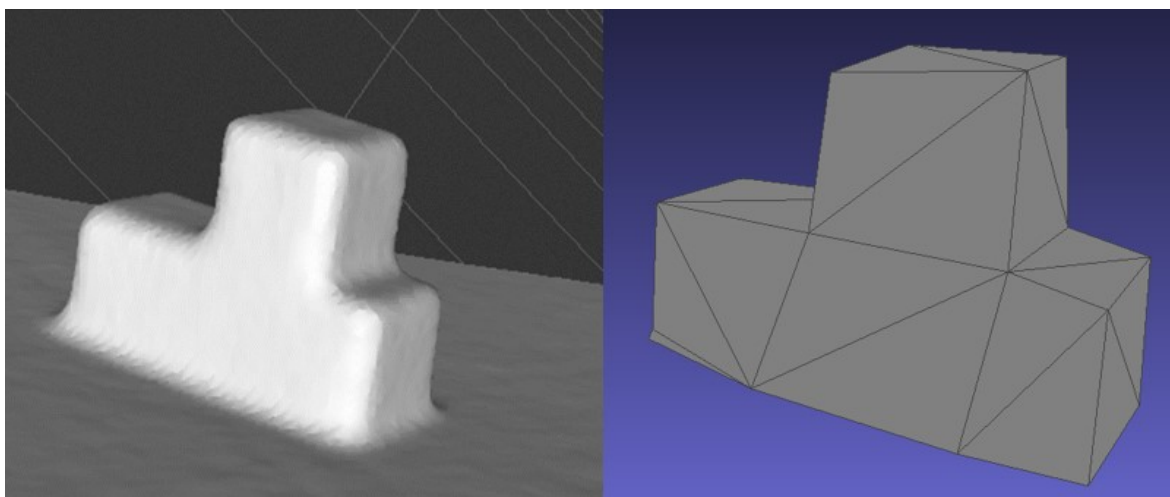
Kinect pro Xbox 360 byl vyvinut jako herní zařízení pro snímání pohybu lidského těla a rozpoznávání gest. Tomu odpovídá také rozlišení 1,3 mm na jeden pixel. Lze jej využít jako 3D skener, ale je vhodnější jej používat ke snímání větších objektů. Snímací rozsah je 0,7-6 m, což dále limituje konstrukci rotačního stolu a stojanu sensoru [26]. Další nevýhodou je praktická absence použitelného bezplatného software, který by zajišťoval snímání v přijatelné kvalitě.

Před zahájením skenování byl povrch referenčního objektu zmatněn pudrem.

Bezplatný software:

- Skanect [39]

Program poskytuje snímání objektů v dobré kvalitě, bezplatná verze však umožňuje export dat pouze s maximálním počtem 5000 trojúhelníků. Díky tomu jsou modely bezplatné verze prakticky nepoužitelné. Cena placené verze: 129\$ [39]

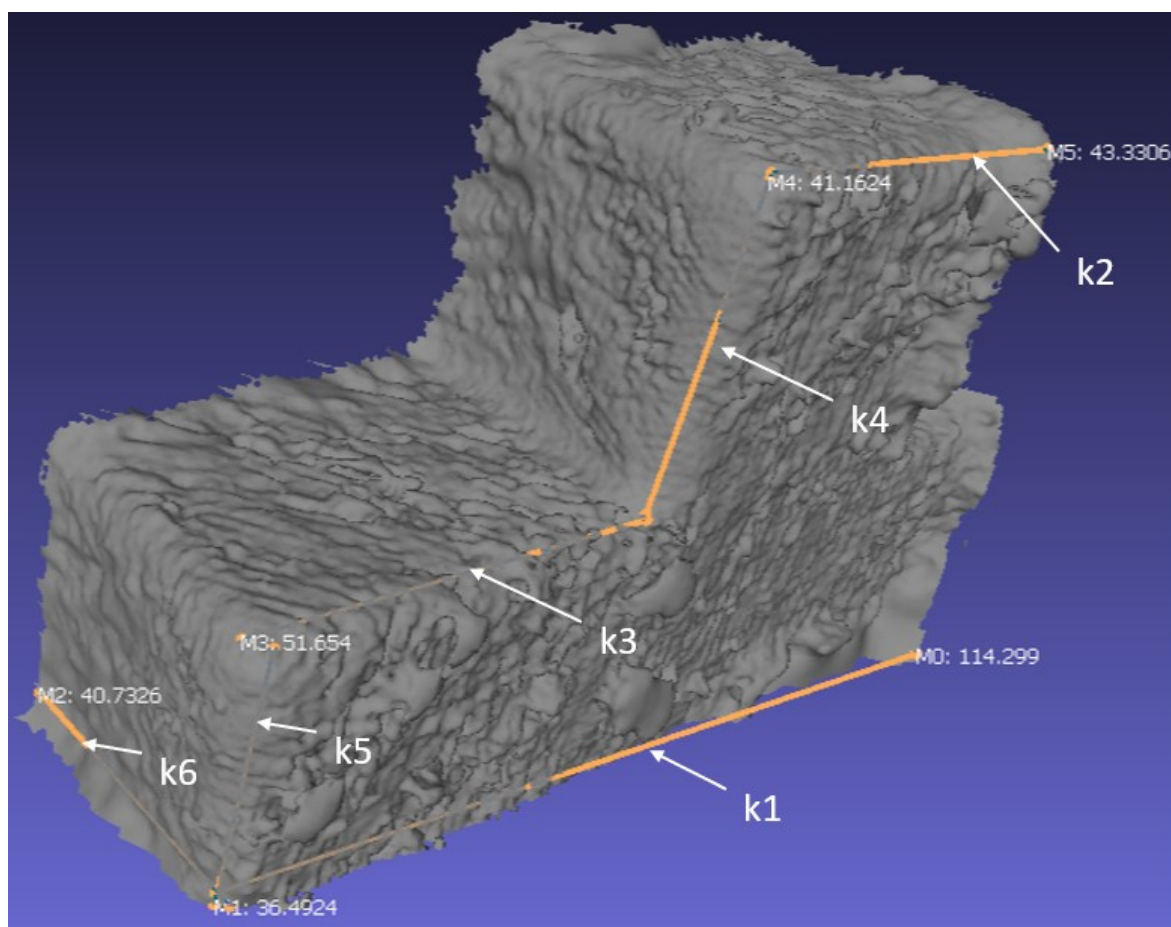


Obr 2.2 - Vlevo: model získaný pomocí Skanect [39], Vpravo: stejný model po redukci počtu trojúhelníků, Meshlab [34]

- SCENE Capture [40]

Bezplatný program společnosti FARO. Snímaná data jsou produkována ve formě mračna bodů. Takže je nutné získaná data dále zpracovat, např. Meshlab [34]. Výsledky snímání jsou ale oproti programu Skanect znatelně horší. Spojování jednotlivých hloubkových map je zde dosti nepřesné, což se znatelně projeví při snímání menších objektů.

Referenční objekt

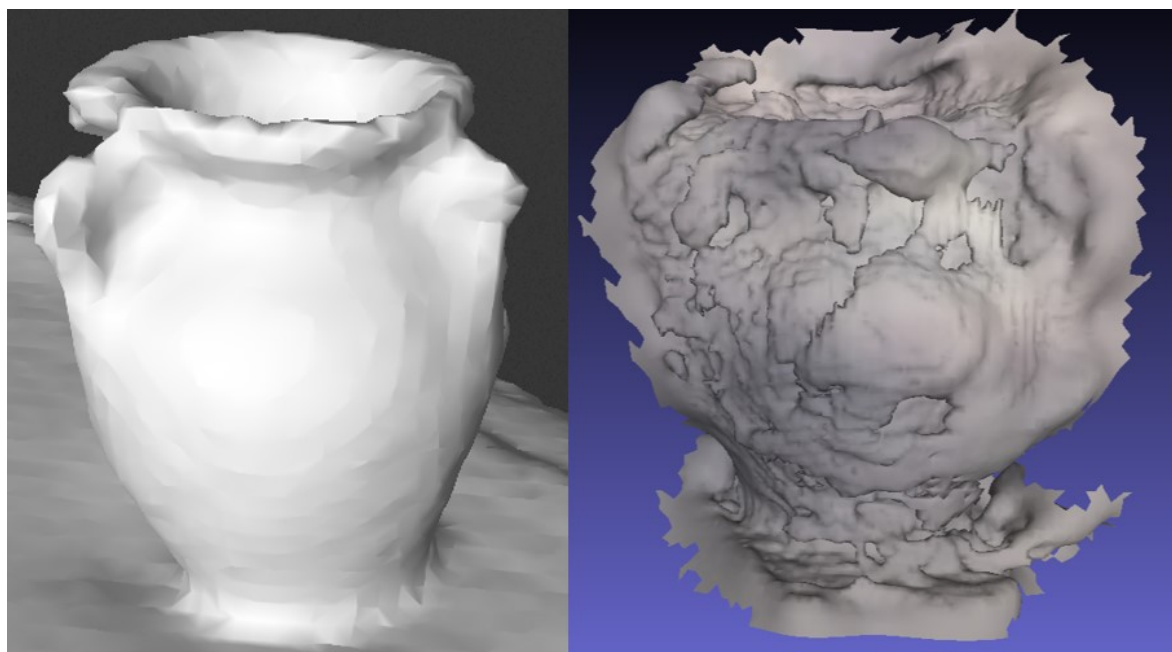


Obr 2.3 - Model získaný pomocí SCENE Capture [40], v Meshlabu [34] bylo upraveno měřítko a změřeny délky stran

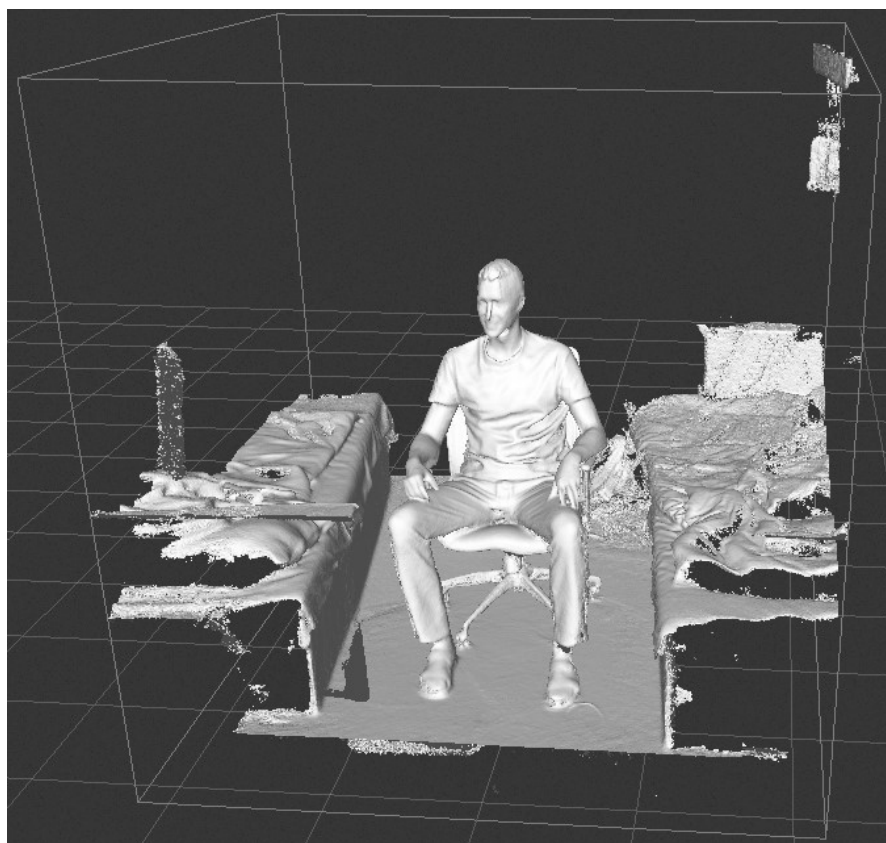
Tabulka 1 - Vyhodnocení odchylek rozměrů modelu získaného pomocí Kinectu 360

	k1[mm]	k2[mm]	k3[mm]	k4[mm]	k5[mm]	k6[mm]
Skut. roz.	109,6	39,9	49,7	40,05	39,9	40,1
Roz. mod.	114,3	43,3	51,5	41,16	36,49	40,73
Odchylka	4,65	3,43	4,86	1,11	3,41	0,63

Maximální odchylka je 4,65 mm.

Keramická váza

Obr 2.4 - Vlevo: model vázy získany pomocí Skanect [39], Vpravo: stejné těleso, program SCENE Capture [40]



Obr 2.5 - Při snímání velkých objektů ale Kinect 360 podává vzhledem ke své ceně výborné výsledky, model získán pomocí programu Skanect [39]

2.2 Fotogrammetrie

Hlavní výhodou této technologie jsou nulové náklady, protože veškeré potřebné vybavení tvoří fotoaparát, kterým je dnes již běžně vybavena většina mobilních telefonů. Jak již bylo uvedeno v kapitole 1.5.2, fotogrammetrie využívá k tvorbě trojrozměrného obrazu porovnávání polohy referenčních prvků na jednotlivých fotografiích. Je tedy nutné, aby snímky obsahovaly dostatek těchto retenčních bodů. Jelikož je při použití rotačního stolu pozadí snímaného objektu neměnné, nemůže být použito jako zdroj referenčních bodů a výpočet trojrozměrného modelu tedy pracuje pouze s referenčními prvky snímaného objektu. Povrchu snímaného objektu proto musí být dostatečně různorodý. Dále je nutné eliminovat veškeré odlesky, které by byly pro výpočetní algoritmus matoucí. Pokud není pozadí dostatečně kontrastní a stejnorodé, je potřeba jej upravit (viz. Obr 2.6), například v editoru GIMP [41].

Pracovní postup

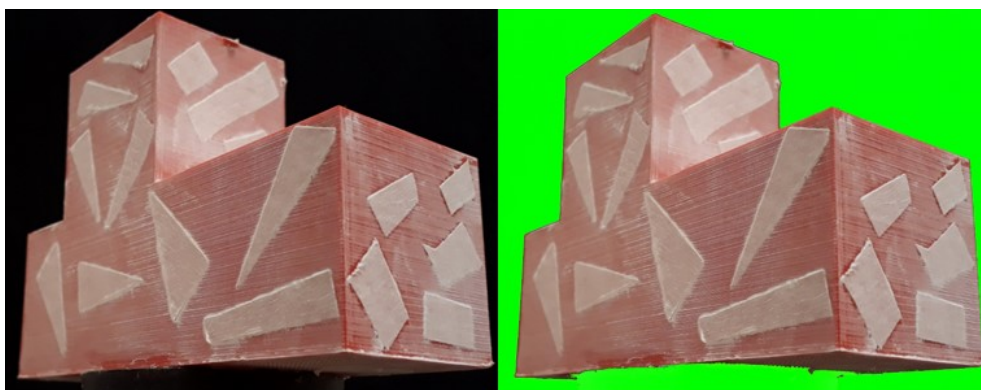
1. Příprava snímaného objektu (tvorba referenčních prvků, zmatnění povrchu)
2. Fotografování, úprava pozadí (editor fotek GIMP [41])
3. Zpracování kolekce fotek a tvorba mračna bodů/trojúhelníkové sítě

Bezplatný SW:

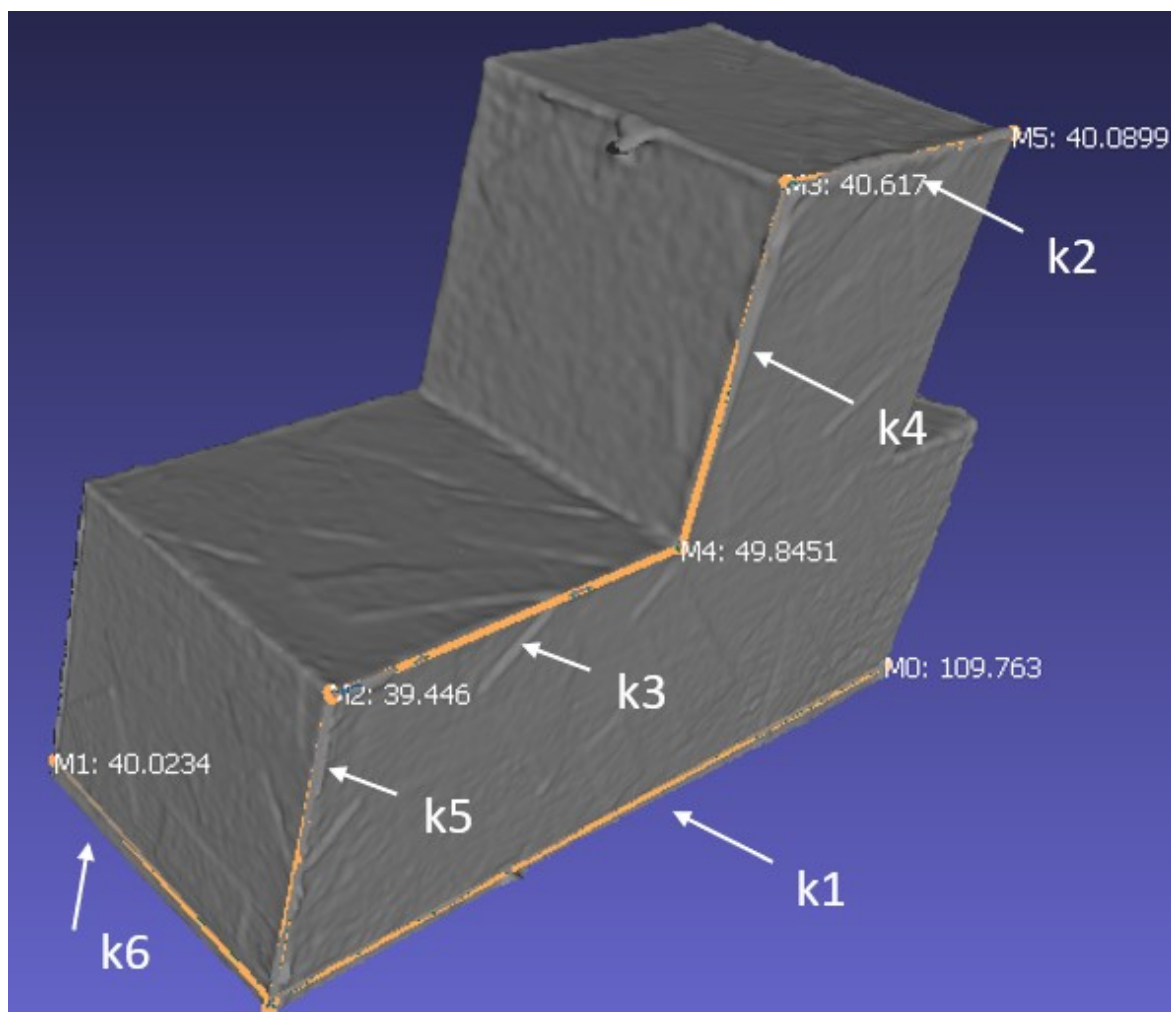
- MVE (Multi-View Enviroment) [42]
výstupem je trojúhelníková síť
 - VisualSFM [43]
výstupem pouze mračno bodů
 - Meshroom/AliceVision [19]
trojúhelníková síť, nutnost GPU nVidia (CUDA)
4. Úprava trojúhelníkové sítě/mračna bodů, bezplatný SW: viz. kapitola 1.6

Referenční objekt

Povrch tělesa je stejnorodý, jednobarevný a lesklý. Proto jsem na povrch nalepil kousky papíru a zmatnil jej pomocí pudru.



Obr 2.6 - Příprava referenčního objektu a následná úprava pozadí v editoru GIMP [41]



Obr 2.7 - Výsledný model získaný z MVE [42], v Meshlab [34] bylo upraveno měřítko a změřeny délky stran

Tabulka 2 - Vyhodnocení odchylek rozměrů modelu získaného fotogrammetrií

	k1[mm]	k2[mm]	k3[mm]	k4[mm]	k5[mm]	k6[mm]
Skut. roz.	109,6	39,9	49,7	40,05	39,9	40,1
Roz. mod.	109,76	40,09	49,85	40,62	39,45	40,02
Odchylka	0,16	0,19	0,15	0,57	0,45	0,08

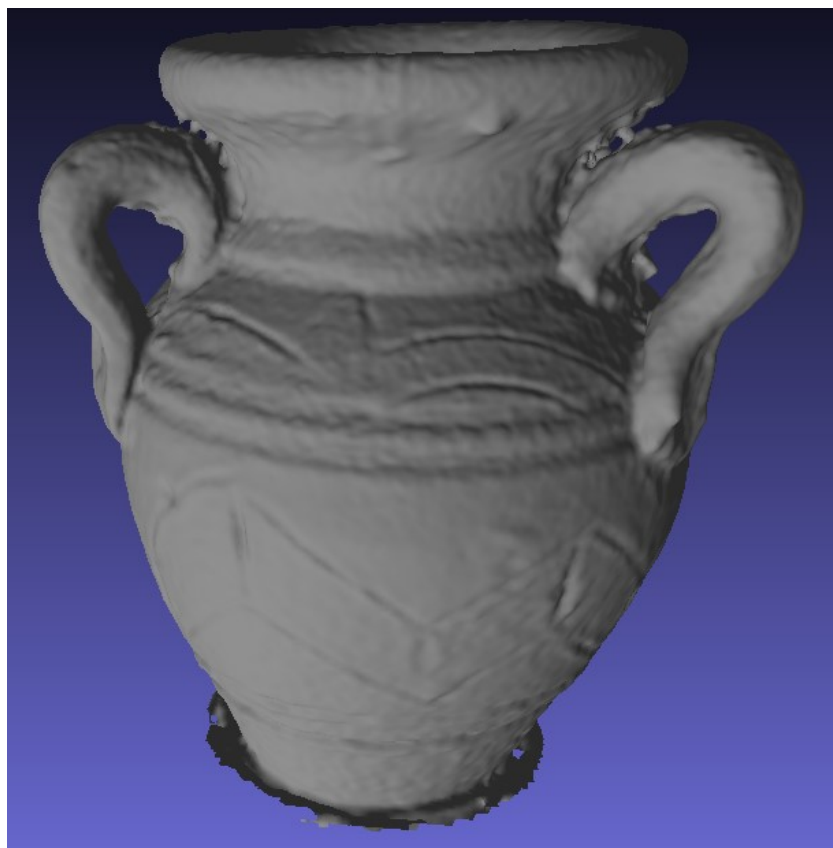
Maximální odchylka je 0,57 mm.

Keramická váza

Povrch vázy poskytuje velké množství referenčních bodů, je matný. Proto nebylo potřeba před snímáním objekt nijak upravovat.



Obr 2.8 - Úprava pozadí snímku vázy pomocí editoru GIMP [41]



Obr 2.9 - Model získaný pomocí MVE [42], trojúhelníková síť upravena pomocí Meshlab [34]

Výsledky jsou velmi pěkné, lze si všimnout i zdobení na povrchu modelu.

Na základě testování byla vybrána technologie fotogrammetrie.

3 Požadavkový list

Po prozkoumání současné situace na trhu se stolními 3D skenery a definování skenovací technologie (**fotogrammetrie**) byly specifikovány tyto parametry 3D skenovacího systému a jeho otočného stolu:

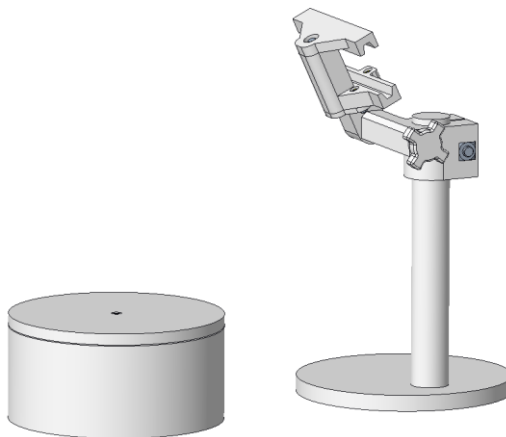
- Maximální rozměry stolu: 500x500x500 mm.
- Maximální rozměry skenovaného objektu: 140x140x140 mm.
- Maximální hmotnost skenovaného objektu: 2 kg.
- Maximální rozměry jednodílné součásti: 25x21x21 cm (tento parametr je definován pracovním prostorem referenční 3D tiskárny Prusa i3 MK3S).
- Tvar skenovaného objektu: libovolný.
- Povrch skenovaného objektu musí být matný, ne čirý (při skenování bez úpravy povrchu pudrem).
- Minimálně 24 snímků během jedné otáčky stolu v jedné úrovni.
- Celková doba skenování do 12 minut.
- Elektrický pohon integrovaný uvnitř stolu.
- Veškerý software pracuje na jednočipovém počítači nebo mikrokontroleru umístěném uvnitř stolu.
- Předpokládáno kvalitní osvětlení místnosti (měkké světlo, redukce stínů).
- Napájení: ze sítě (230 V).
- Stupeň krytí: IP20.
- Výrobek je určen pouze pro použití uvnitř budov.
- Rozsah provozních teplot: (15-30°C).
- Celkové náklady nižší než 4 000Kč.
- Přesnost skenování: 0,25 mm.
- Výstupní formáty: point cloud, triangle mesh, PLY, STL.

4 Varianty řešení

Byly vytvořeny čtyři varianty (A, B, C, D) rotačního stolu pro 3D skenování pomocí metody fotogrammetrie. Jako snímací zařízení je uvažován fotoaparát mobilního telefonu. U variant A, B rotuje deska stolu, přičemž pozice fotoaparátu je neměnná. Pozadí snímaného objektu je neměnné, což máte vyhodnocovací SW (**viz. kapitola 1.5.2**). Proto je nutné pozadí opatřit jednobarevným plátnem. Tato nevýhoda je zohledněna v **kapitole 5**. Naopak výhodou neměnného pozadí je neměnná kompozice fotek během snímání, tedy i vyšší ostrost fotografií (fotoaparát nemusí měnit svá nastavení). Konstrukční varianty C, D obsahují statickou desku stolu, kolem které rotuje snímací zařízení (mobilní telefon) na polohovacím rameni. Pozadí snímaného objektu je proměnlivé, není tedy nutné pozadí objektu nahrazovat plátnem. Nevýhodou je změna kompozice jednotlivých fotografií během pohybu ramena, což má za následek menší ostrost fotografií. U variant A, C a D je proces snímání automatizován jen částečně, varianta B je automatizována zcela. Dále je nutné zohlednit počet dílů, které svými rozměry přesahují pracovní prostor (25x21x21cm) referenční 3D tiskárny (Prusa i3 MK3S). Díly vyrobené pomocí 3D tisku (ve schématech zobrazeno bílou barvou) využívají materiál PET-G. V seznamech nakupovaných dílů jednotlivých variant je cena krokového motoru a řídicí jednotky pouze orientační. Cena filamentu 475[Kč/kg] pochází z [44].

4.1 Varianta A.

Konstrukce se skládá ze samostatného rotačního stolu a stativu mobilního telefonu.

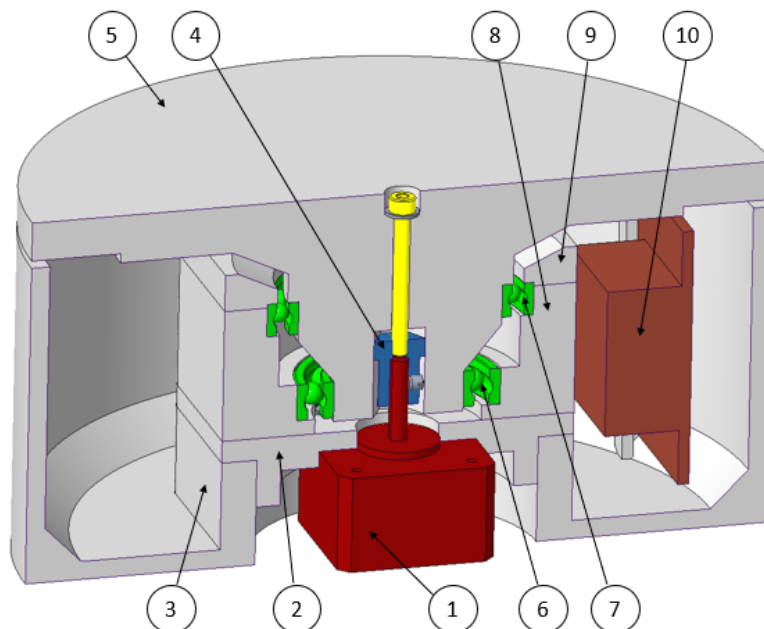


Obr 4.1 - Varianta A

4.1.1 Rotační stůl

U této varianty je krokový motor (1) připevněn za přírubu k uložení motoru (2), nachází se v ose základny stolu (3). Krouťací moment motoru je pomocí stavěcího šroubu přenesen na hliníkovou redukci (4), která skrze tvarový styk šestihranu přenáší otáčivý pohyb na desku stolu (5). Deska stolu je přitlačována k adaptéru pomocí šroubu v ose stolu, takto je zaručena soudržnost celé konstrukce. Zatížení od snímaného objektu přenáší dvě

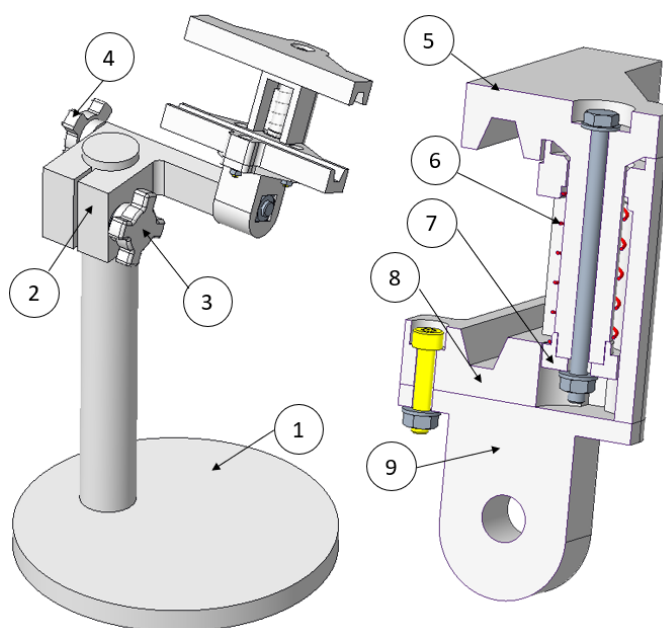
jednořadá kuličková ložiska: 61907 (6) a 61811 (7), která jsou uložena v uložení ložisek (8). Ložisko 61811 (7) je navíc přitlačováno víčkem (9). Na Obr 4.2 je viditelná také řídicí elektronika (10).



Obr 4.2 - Řez rotačním stolem, varianta A

4.1.2 Stativ mobilního telefonu

Základem stativu mobilního telefonu je stojan stativu (1), po kterém lze posouvat svěrné těleso (2), pozice tohoto tělesa lze zajistit utažením šroubu, na jehož hlavě je nasazeno fixační kolečko (3). Čelisti (5,8) lze naklopit kolem otočného držáku (9) povolením šroubu, na jehož hlavě je nasazeno fixační kolečko (4). Mobilní telefon je svírán čelistí horní (5) a spodní (8), které jsou k sobě přitlačovány pomocí pružiny (6). Pružina se opírá o píst (7).



Obr 4.3 - Popis stativu mobilního telefonu

Výhodou je jednoduchá konstrukce a malý počet nakupovaných dílů. Nevýhodou je nutnost dělit stojan stativu. V případě vybrání této varianty za optimální by bylo možné použít pro stojan stativu (1) např. hliníkovou tyč, dále by bylo vhodné vybavit čelisti (5,8) vložkou z měkkého filamentu (například TPU 30D). Tato varianta využívá snímání se statickým pozadím objektu, což klade nároky na jednobarevné pozadí a kvalitní osvětlení (redukce stínů, neurčitost zdroje světla).

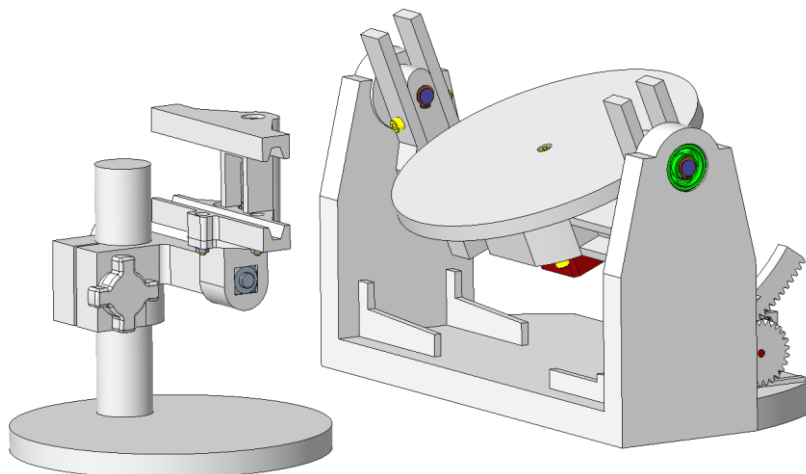
Dále je nutné si uvědomit, že je skenovací proces automatizován jen částečně, tedy že snímání probíhá bez zásahu operátora pouze po jednu otáčku. Pokud je potřeba nasnímat daný objekt z jiných úhlů, musí zasáhnout operátor a změnit orientaci stativu pomocí fixačních koleček (3,4) (viz. Obr 4.3). Úroveň automatizace skenování je stejná i u variant C a D.

Tabulka 3 – Parametry varianty A

Parametr	Hodnota
Obecné parametry	
Hmotnost	1,47[kg]
Spotřeba filamentu	0,99[kg] \cong 470[Kč]
Počet nutných dělení při 3D tisku	1[–]
Počet dílů (mimo spojovací materiál)	19[–]
Počet nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	6[–]
Cena nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	1463[Kč]
Metoda skenování	fotogrammetrie – statické pozadí
Míra automatizace skenovacího procesu	částečná
Seznam nakupovaných dílů	
Krokový motor – předběžná cena	300[Kč]
Řídící elektronika – předběžná cena	900[Kč]
Ložisko 61811	132[Kč] [45]
Ložisko 61907	51[Kč] [46]
Redukce	1,4[\$] \cong 36[Kč] [47]
Pružina	1,6[€] \cong 44[Kč] [48]

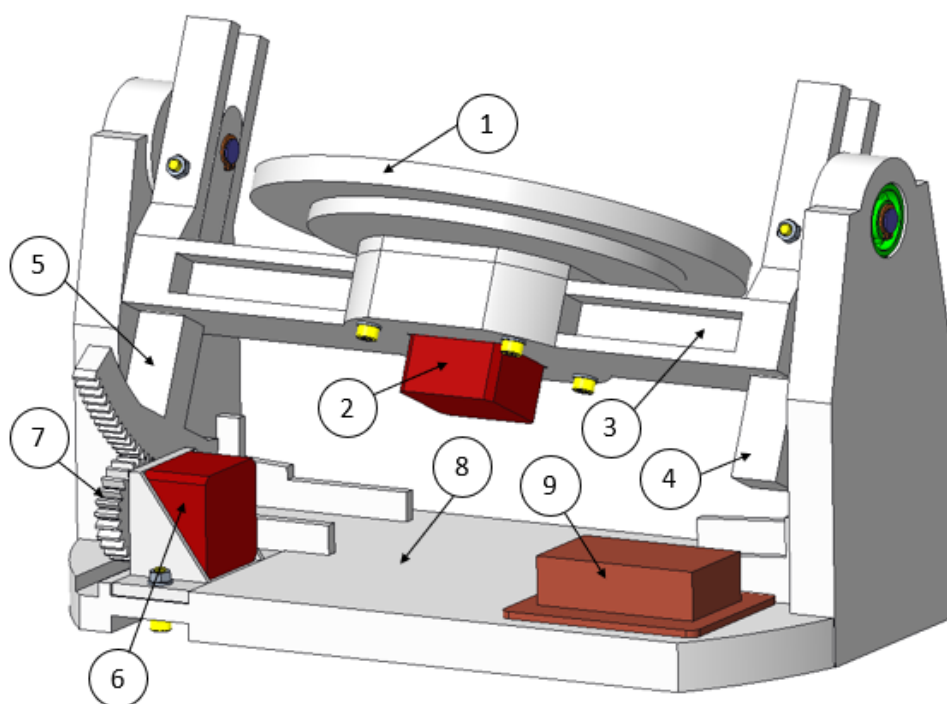
4.2 Varianta B

Konstrukce se skládá ze samostatného naklopitelného stolu a stativu mobilního telefonu. Stativ mobilního telefonu je identický se stativem ve variantě A, pouze byl zkrácen rozsah posuvu.



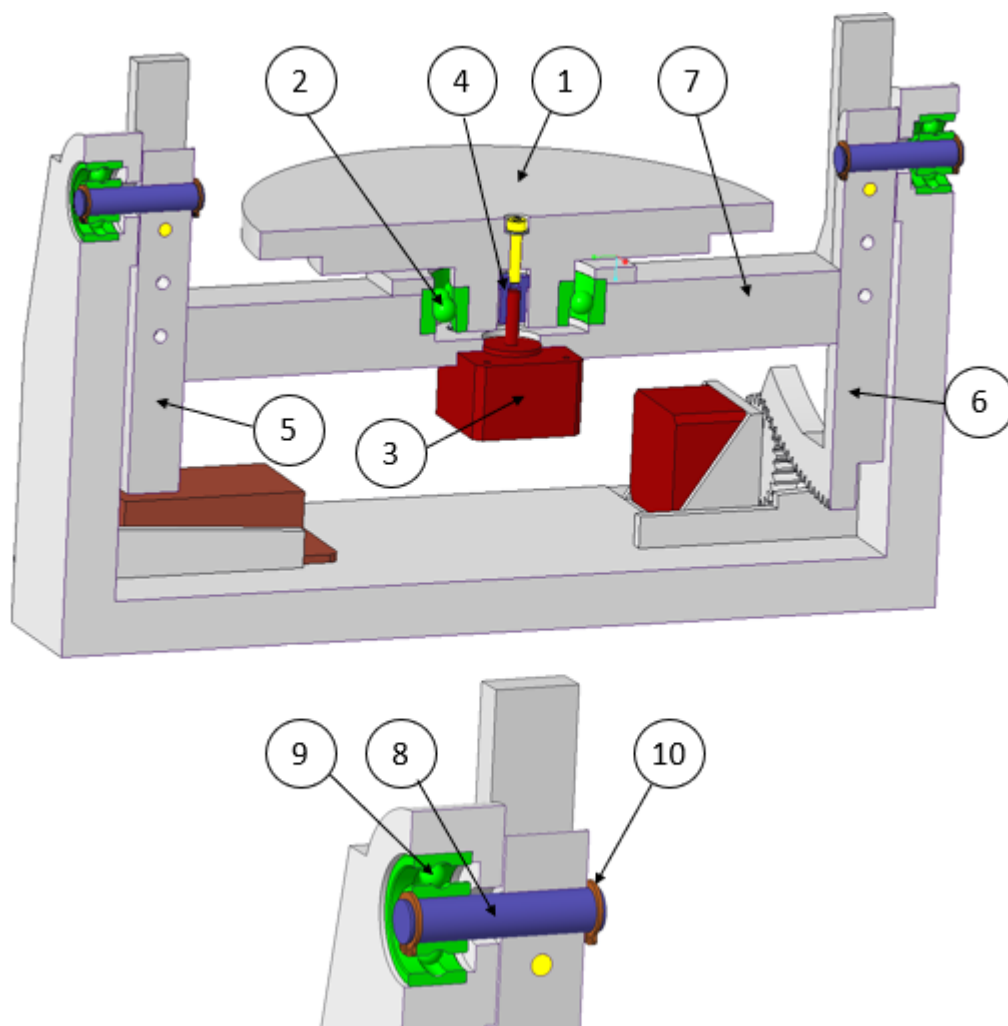
Obr 4.4 - Varianta B

Varianta B umožňuje dva nezávislé pohyby snímaného objektu (viz. Obr. 4.5). Rotaci kolem vertikální osy skrze otočnou desku stolu (1) poháněnou krokovým motorem (2) a rotaci kolem horizontální osy pomocí naklopitelného lože stolu (3). Naklopitelné lože je dále možné manuálně polohovat podél podpěr (4,5), poloha lože je vymezena dvěma šrouby. Krokový motor (6) zabírá skrze pastorek (7) do ozubené podpěry (5) a naklápí tak lože stolu (3), to vše, včetně řídicí elektroniky, (9) je uloženo na základně stolu (8).



Obr 4.5 - Naklopitelný rotační stůl, varianta B

Uložení (viz. Obr. 4.6) otočné desky stolu (1) zaručuje jednořadé kuličkové ložisko s kosoúhlým stykem 7207B (2). Přenos krouticího momentu z krokového motoru (3) na desku stolu vykonává redukce (4). Podpěry-ABS (5,6), nesoucí lože stolu (7), jsou skrze dvě ocelové osy (8) uloženy ve dvou ložiskách 62200 (9). Vysunutí os brání čtyři pojistné kroužky ČSN 02 2930 (10).



Obr 4.6 - Řez naklopitelným stolem, varianta B

Tato konstrukce dokáže jako jediná z uvedených variant pracovat ve zcela autonomním režimu. Tedy, lidský zásah je nutný pouze při umístění a následovném odebrání skenovaného objektu. Objekt je nasnímán ze všech stran pomocí otáčení desky stolu. Jakmile je dokončeno otočení desky stolu o 360°, následuje naklopení lože stolu a celý cyklus se opakuje. Takto je postupováno, dokud není daný objekt nasnímán ze všech potřebných úhlů.

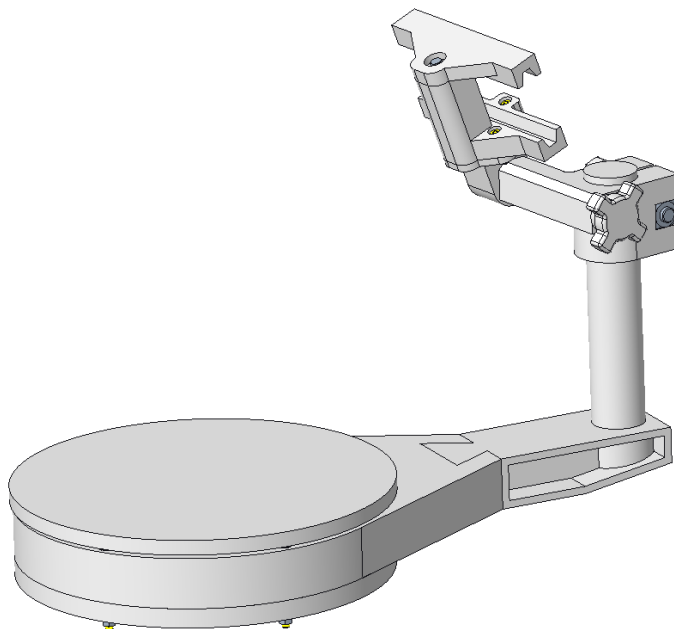
Nevýhodou této konstrukce je nutnost rozdělit lože (3) a základnu stolu (8) (viz. Obr. 4.5) z důvodu překročení pracovního prostoru 3D tiskárny. Další komplikací je nutnost vybavit desku stolu (1) (viz. Obr. 4.6) úchopným systémem bránícím sesunutí snímaného objektu při naklopení lože stolu (7).

Tabulka 4 - Parametry varianty B

Parametr	Hodnota
Obecné parametry	
Hmotnost	2,83[kg]
Spotřeba filamentu	1,45[kg] \cong 688,75[Kč]
Počet nutných dělení při 3D tisku	2[–]
Počet dílů (mimo spojovací materiál)	30[–]
Počet nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	14[–]
Cena nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	2010[Kč]
Metoda skenování	fotogrammetrie – statické pozadí
Míra automatizace skenovacího procesu	úplná
Seznam nakupovaných dílů	
2x Krokový motor – předběžná cena	600[Kč]
Řídící elektronika – předběžná cena	900[Kč]
Ložisko 7207B	149[Kč] [49]
Redukce	1,4[\$] \cong 36[Kč] [47]
Pružina	1,6[€] \cong 44[Kč] [48]
2x Ložisko 62200	112[Kč] [50]
4x ČSN 02 2930	1[Kč] [51]
2x Osové čepy	168[Kč] [52]

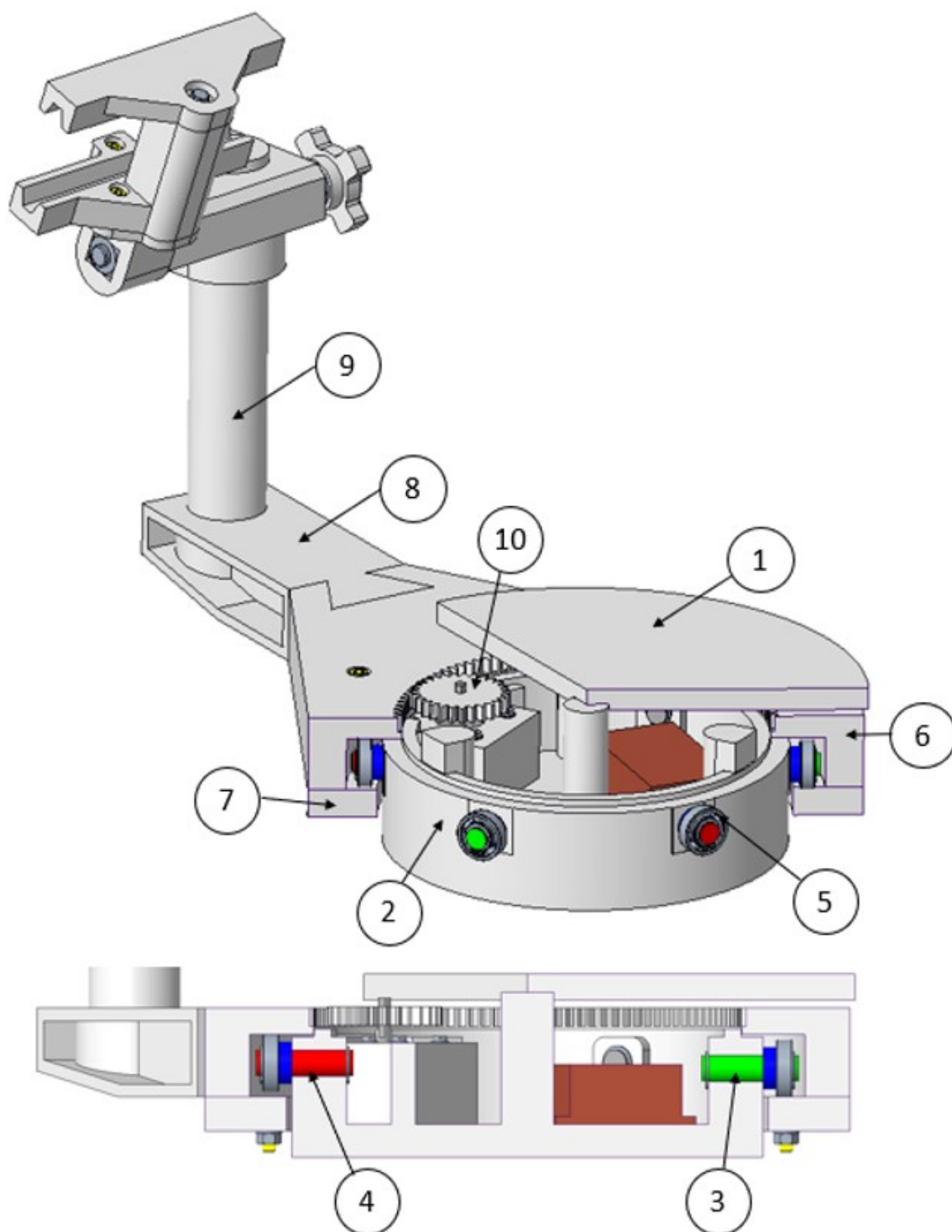
4.3 Varianta C

Varianta C se skládá ze statického stolu a rotujícího prstence s ramenem nesoucím stativ mobilního telefonu.



Obr 4.7 - Varianta C

Statická deska stolu (1) (viz. Obr. 4.8) je uložena na základně stolu (2), do které jsou zasunuty 3 osové čepy (3) (zeleně) a 3 osové čepy (4) (červeně) se vzdáleností osy od podložky základny stolu (2) 34 a 36 mm. Tento rozdíl ve výšce os zajišťuje správné odvalování šesti ložisek 61900 (5). Jedna trojice ložisek uložených na čepích (4) (červeně) se tak odvaluje po ozubeném prstenci (6) a druhá trojice ložisek uložených na čepích (3) (zeleně) se odvaluje po spodním víku (7). Ozubený prstenec (6) a spodní víko (7) jsou k sobě přišroubovány šesti šrouby, tím je zajištěno stabilní vedení ramene (8), které je rybinovou drážkou zasunuto a zalepeno do ozubeného prstence (6). Do kruhového otvoru ramene (8) je zasunut a zalepen válec (9). Po tomto válci lze posouvat stativ mobilního telefonu, který je identický s verzemi A, B a D. Otáčení ozubeného prstence (6) kolem základny stolu (2) je zajištěno pomocí pastorku (10), který zabírá do vnitřního ozubení prstence. Krokový motor otáčející pastorkem je zasunut do základny stolu (2) zespodu. Deska stolu (1) musí být oproti ostatním variantám větší, a to proto aby zakryla hlavy šroubů spojujících ozubený prstenec (6) a spodní víko (7). Hlavy šroubů musí být zakryty, protože se pohybují současně s fotoaparátem, a oproti měnící se orientaci skenovaného objektu a pozadí v průběhu skenování by byly vždy na stejném místě. Toto by zaručeně mátl vyhodnocovací SW (viz kapitola 1.5.2).



Obr 4.8 - Popis varianty C

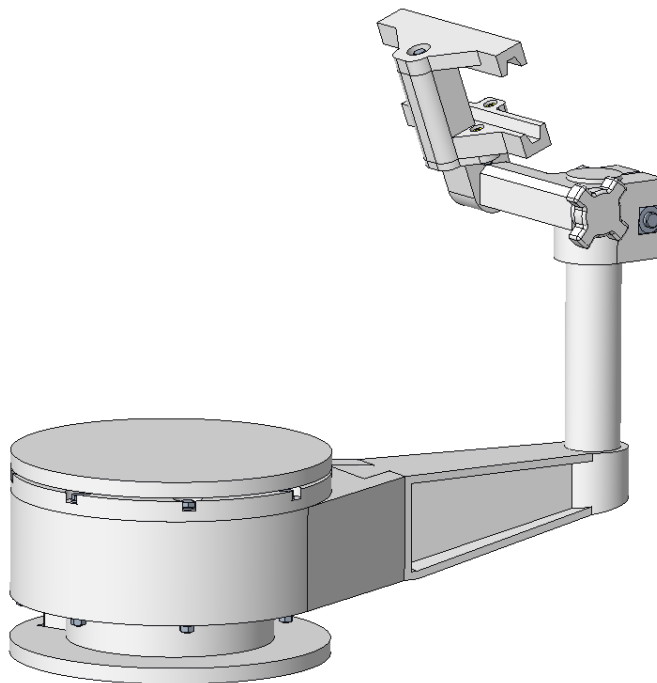
Výhodou této varianty jsou nízké pořizovací náklady a metoda skenování s proměnlivým pozadím. Nevýhodou je komplikovanost konstrukce a velký počet dílů přesahujících pracovní prostor 3D tiskárny. Z důvodu vyrobitelnosti by bylo nutné rozdělit ozubený prstenec (6), spodní víko (7) a desku stolu (1). Dělení ozubeného prstence a spodního víka je problematické, poněvadž se jedná o prvky se zásadním vlivem na tuhost celé konstrukce. Automatizace skenování je částečná, tedy stejná jako u varianty A a D.

Tabulka 5 - Parametry varianty C

Parametr	Hodnota
Obecné parametry	
Hmotnost	1,88[kg]
Spotřeba filamentu	1,16[kg] \cong 551[Kč]
Počet nutných dělení při 3D tisku	3[–]
Počet dílů (mimo spojovací materiál)	47[–]
Počet nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	27[–]
Cena nakupovaných dílů (mimo spoj. mat.)	1842[Kč]
Metoda skenování	fotogrammetrie – proměnlivé
Míra autonomnosti skenovacího procesu	částečná
Seznam nakupovaných dílů	
Krokový motor – předběžná cena	300[Kč]
Řídící elektronika – předběžná cena	900[Kč]
6x Ložisko 61900	91,2[Kč] [53]
6x Osové čepy	504[Kč] [52]
12x ČSN 02 2930	3[Kč] [51]
Pružina	1,6[€] \cong 44[Kč] [48]

4.4 Varianta D

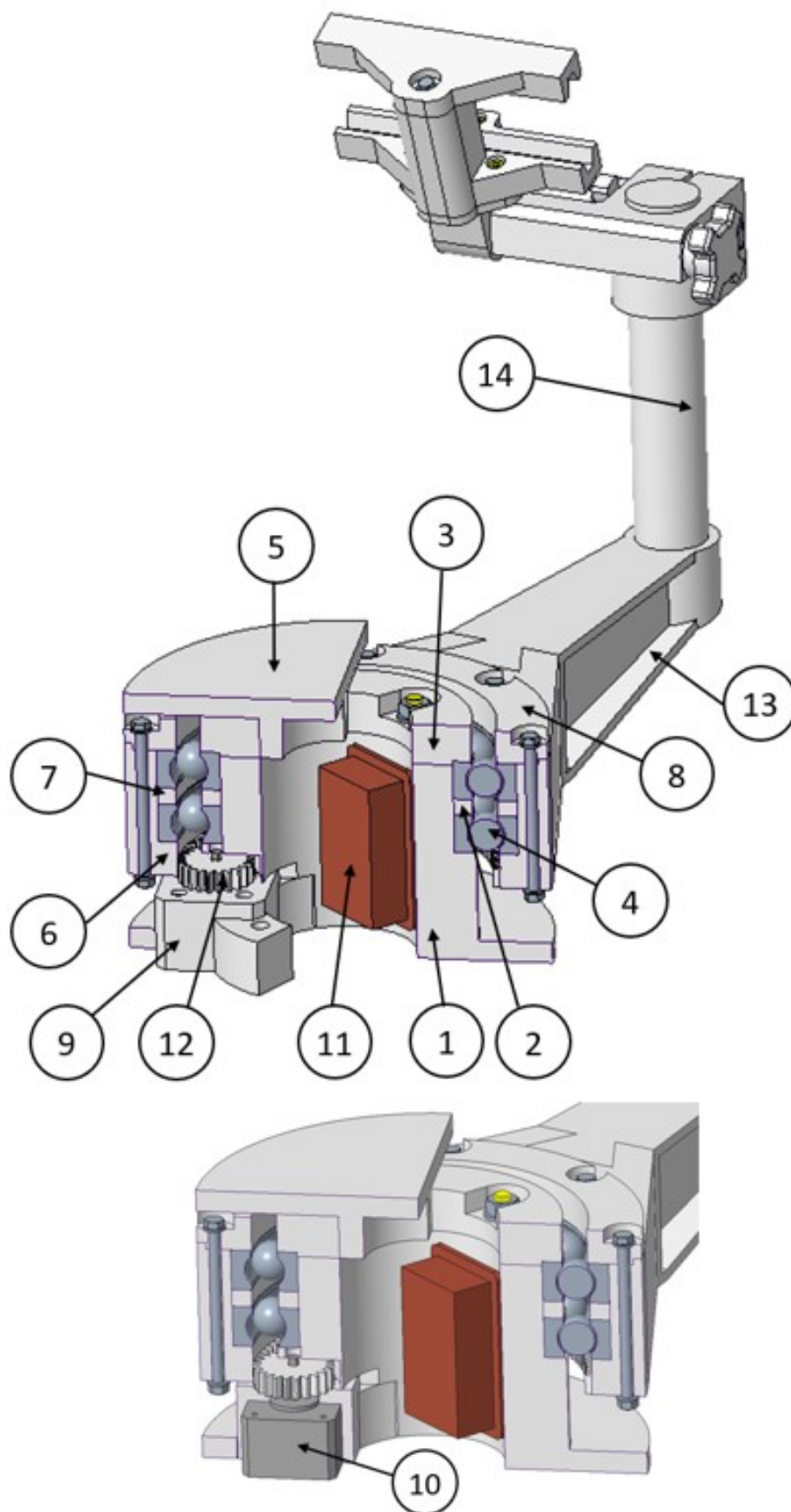
Varianta pracuje na stejném principu jako varianta C. Kolem statické desky stolu rotuje rameno se stativem mobilního telefonu.



Obr 4.9 - Varianta D

Statická základna stolu (1) (viz. Obr. 4.10), distanční kroužek (2) a statické víko (3) svírají vnitřní kroužky dvou ložisek 16022 (4). Do statického víka (3) je zasunuta deska stolu (5). Vnější kroužky ložisek jsou svírány ozubeným prstencem (6), vnějším distančním kroužkem (7) a horním prstencem (8). Do statické základny stolu (1) je zespodu zasunuto pouzdro (9), ve kterém je za přírubu připevněn krokový motor (10). Dále je zde uložena řídicí elektronika (11). Krokový motor otáčí s pastorkem (12), který zabírá do vnitřního ozubení ozubeného prstence (6). Tím je zapříčiněna rotace vnějších kroužků ložisek (4). Rameno (13) je zasunuto do rybinové drážky ozubeného prstence (6). Do kruhového otvoru ramene je zasunut a zalepen válec (14), po kterém lze posouvat stativ mobilního telefonu.

Výhodou této varianty je jednoduchost konstrukce a metoda snímání s proměnlivým pozadím. Navíc všechny díly odpovídají pracovnímu prostoru referenční 3D tiskárny. Nevýhodou jsou vysoké pořizovací náklady a vysoká hmotnost. Automatizace skenování je částečná (tak jako u variant A a C).



Obr 4.10 - Popis varianty D

Tabulka 6 – Parametry varianty D

Parametr	Hodnota
Obecné parametry	
Hmotnost	5,3[kg]
Spotřeba filamentu	1,32[kg] \cong 627[Kč]
Počet nutných dělení při 3D tisku	0[–]
Počet dílů (mimo spojovací materiál)	23[–]
Počet nakupovaných dílů (mimo spoj.	5[–]
Cena nakupovaných dílů (mimo spoj.	2399[Kč]
Metoda skenování	fotogrammetrie – proměnlivé pozadí
Míra autonomnosti skenovacího	částečná
Seznam nakupovaných dílů	
Krokový motor – předběžná cena	300[Kč]
Řídící elektronika – předběžná cena	900 [Kč]
2x Ložisko 16022	1155[Kč] [54]
Pružina	1,6[€] \cong 44[Kč] [48]

5 Porovnání variant a výběr optimální varianty

V této kapitole je vybrána jedna varianta na základě níže uvedených hodnotících kritérií. Váha významnosti jednotlivých kritérií je určena z počtů voleb získaných metodou porovnávání v trojúhelníku párů. Poté je určen vážený index, tedy hodnota plnění daného kritéria (úspěšnost) vynásobená jeho váhou významnosti. Vážené indexy se v rámci jednotlivých variant sečtou a porovnají. Varianta s nejvyšším součtem vážených indexů je označena za optimální.

5.1 Popis hodnocených kritérií

Tabulka 7 – Souhrn hodnocených kritérií

Kritéria	Název	Popis
K1	Cena	Cena nakupovaných dílů.
K2	Spotřeba filamentu	Množství použitého materiálu (filamentu) při 3D tisku.
K3	Metoda skenování	Statické/proměnlivé pozadí. Nutnost použití plátna.
K4	Počet dílů	Komplikovanost konstrukce vyjádřená počtem dílů.
K5	Autonomnost	Úroveň samostatnosti skenovacího procesu.
K6	Počet dělení	Počet dílů přesahujících pracovní prostor 3D tiskárny.
K7	Hmotnost	Celková hmotnost navržené konstrukce.

5.2 Hodnocení

Úroveň plnění jednotlivých kritérií je hodnocena v rozsahu od 1 do 4, kdy hodnota 4 označuje nejlepší stav a hodnota 1 nejhorší v daném kritériu.

Tabulka 8 – Způsob hodnocení úrovně plnění jednotlivých kritérií

Hodnocení plnění kritérií	
4	Nejlepší stav
1	Nejhorší stav

Významnost kritérií je hodnocena v rozsahu hodnot od 2 do 1.

Tabulka 9 – Způsob hodnocení významnosti jednotlivých kritérií

Významnost kritérií	
2	Nejvyšší
1	Nejnižší

5.3 Metoda porovnání v trojúhelníku párů – váha významnosti

Tato metoda zajišťuje vzájemné porovnání všech hodnotících kritérií. Při porovnávání každého páru je přiřazena jedna volba důležitějšímu kritériu. Pokud jsou dvě kritéria stejně důležitá, je připočtena každému polovina volby. Váha významnosti je vypočtena podle následujícího vztahu (4):

$$v = 0,2 \cdot p + 1 \quad (4)$$

v – váha významnosti

p – počet voleb

Tabulka 10 – Metoda porovnání v trojúhelníku párů

						Počet voleb	Pořadí	Váha významnosti
k1	k1	k1	k1	k1	k1	5	1	2
k2	k3	k4	k5	k6	k7	5	1	2
	k2	k2	k2	k2	k2	3	2	1,6
	k3	k4	k5	k6	k7	1	4	1,2
		k3	k3	k3	k3	2	3	1,4
		k4	k5	k6	k7	5	1	2
			k4	k4	k4	0	5	1
			k5	k6	k7			
				k5	k5			
				k6	k7			
					k6			
					k7			

5.4 Porovnání variant

Úroveň plnění (úspěšnost) variant pro jednotlivá kritéria byla hodnocena hodnotou 4 pro nejlepší stav a 1 pro nejhorší stav, mezilehlé hodnoty byly ohodnoceny pomocí lineární interpolace. Kritéria K3 a K5 mají pouze dva možné stavy, nejlepší stav byl hodnocen hodnotou 4, druhý stav hodnotou 3. (viz. tabulka 12)

Tabulka 11 – Souhrn hodnot kritérií pro jednotlivé varianty

Souhrn hodnot kritérií pro jednotlivé varianty				
Kritérium	A	B	C	D
k1 [Kč]	1463	2010	1842	2399
k2 [kg]	0,99	1,45	1,16	1,32
k3 [-]	statické pozadí	statické pozadí	proměnlivé pozadí	proměnlivé pozadí
k4 [-]	19	30	47	23
k5 [-]	částečná	úplná	částečná	částečná
k6 [-]	1	2	3	0
k7 [kg]	1,47	2,83	1,88	5,3

Tabulka 12 – Porovnání variant

Porovnání variant									
Kritérium	Hodnota				Významnost	Vážený index			
	A	B	C	D		A	B	C	D
K1	4	2,25	2,79	1	2	8	4,5	5,58	2
K2	4	1	2,89	1,85	2	8	2	5,78	3,7
K3	3	3	4	4	1,6	4,8	4,8	6,4	6,4
K4	4	2,82	1	3,57	1,2	4,8	3,384	1,2	4,284
K5	3	4	3	3	1,4	4,2	5,6	4,2	4,2
K6	3	2	1	4	2	6	4	2	8
K7	4	2,93	3,68	1	1	4	2,93	3,68	1
Celkový součet vážených indexů						39,8	27,214	28,84	29,584

Na základě porovnání byla vybrána varianta A.

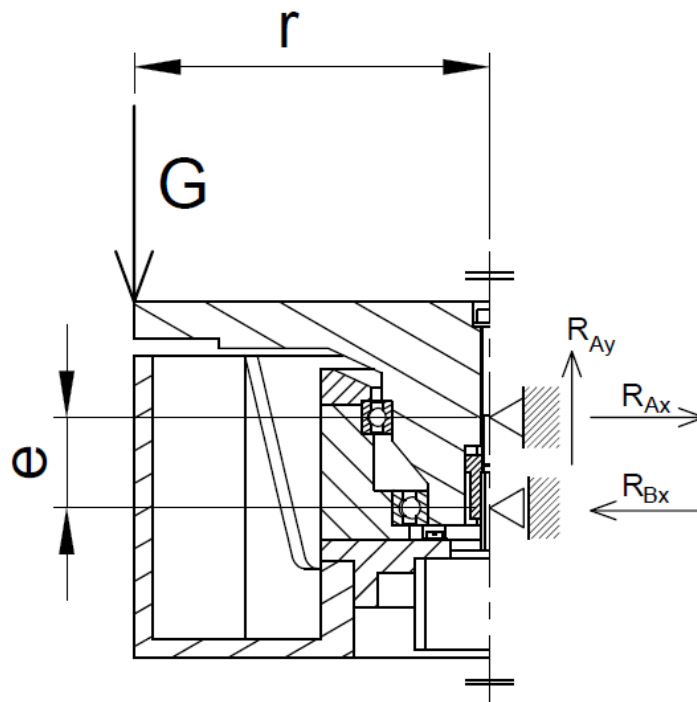
6 Zatížení rotačního stolu

Na základě parametrů skenovaného objektu definovaných v požadavkovém listě je v této kapitole určeno maximální zatížení rotačního stolu.

Největší namáhání konstrukce nastane tehdy, když je těžiště skenovaného objektu na samém okraji desky stolu, viz Obr 6.1

Výchozí parametry:

- maximální rozměry skenovaného objektu: 140x140x140 [mm]
- $m_{max} = 2[kg]$ – maximální hmotnost skenovaného objektu
- $m' = 0,340[kg]$ – zatížení ložisek od konstrukce stolu, určeno v PTC Creo
- $r = 100[mm]$ – vzdálenost těžiště skenovaného objektu od osy rotace



Obr 6.1 – Schéma kritického zatížení stolu

Jak je zřejmé z Obr 6.1, tíhovým účinkem $G[N]$ skenovaného objektu je axiálně zatěžována pouze podpora A (ložisko 61811) skrze reakci $R_{Ay}[N]$. Účinky klopného momentu $M_{kl}[N \cdot mm]$ vyvolaného zatížením $G[N]$ na rameni $r[mm]$ zachycují obě podpory A, B (ložisko 61907) skrze reakce $R_{Ax}[N]$ a $R_{Bx}[N]$. Ty jsou od sebe vzdáleny o rozteč $e[mm]$.

Výpočet tíhy $G[N]$

$g = 9,81[m \cdot s^{-2}]$ – tíhové zrychlení

$$G = (m_{max} + m') \cdot g \quad (5)$$

$$G = 2,340 \cdot 9,81 = 23 [N]$$

Výpočet klopného momentu $M_{kl}[N \cdot mm]$

$r = 100[mm]$ – vzdálenost těžiště skenovaného objektu od osy rotace

$$M_{kl} = G \cdot r \quad (6)$$

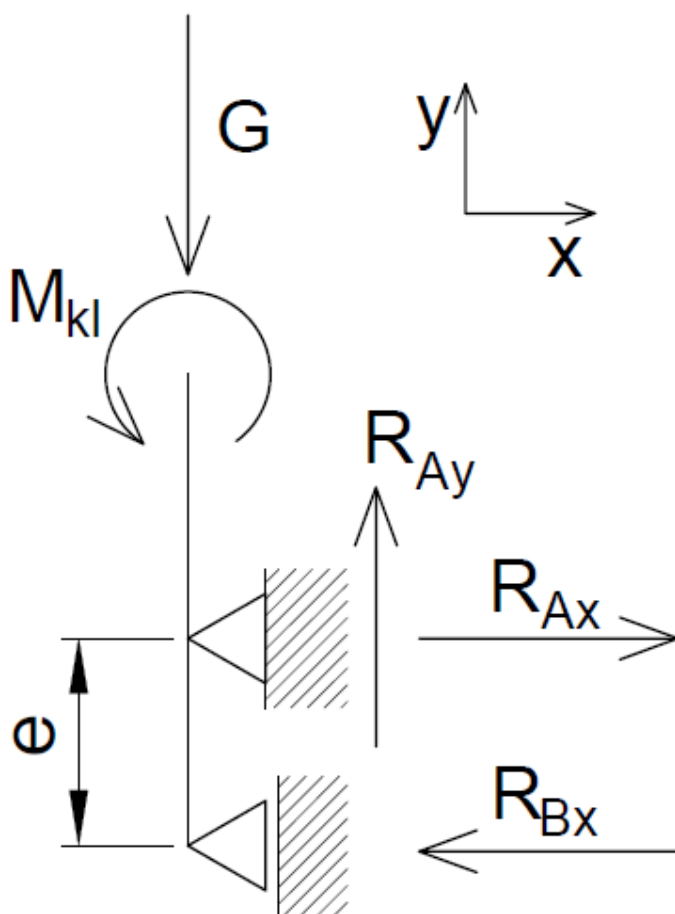
$$M_{kl} = 23 \cdot 100 = 2300 [N \cdot mm]$$

6.1 Výpočet reakcí

Po určení tíhy $G[N]$ a momentu $M_{kl}[N \cdot mm]$ následuje výpočet reakcí na podporách.

Tabulka 13 – Výchozí hodnoty pro výpočet reakcí

Parametr	Popis	Hodnota
G	Tíha skenovaného objektu	23[N]
M_{kl}	Klopný moment od tíhy $G[N]$ na rameni $r[mm]$	2300[N · mm]
e	Vzdálenost podpor A a B	23,5[mm]
R_{Ay}	Axiální reakce na podpoře A	[N]
R_{Ax}	Radiální reakce na podpoře A	[N]
R_{Bx}	Radiální reakce na podpoře B	[N]



Obr. 6.2 – Schéma výpočtu reakcí

$$\sum F_x = 0: R_{Ax} - R_{Bx} = 0$$

$$R_{Ax} = R_{Bx} \quad (7)$$

$$\sum F_y = 0: R_{Ay} - G = 0$$

$$R_{Ay} = G = 23[N] \quad (8)$$

$$\sum M_B = 0: M_{kl} - R_{Ax} \cdot e = 0$$

$$R_{Ax} = \frac{M_{kl}}{e} = \frac{2300}{23,5} = 97,9[N] \rightarrow R_{Bx} = R_{Ax} = 97,9[N] \quad (9)$$

Pevnostní výpočty tištěných dílů nejsou vzhledem k jejich vysoké náročnosti provedeny. Namáhané tištěné díly by bylo vhodné testovat experimentálně.

7 Výpočet ložisek

Ložiska jsou vzhledem ke kyvnému charakteru pohybu stolu kontrolována pouze na statickou bezpečnost $s_0[-]$. Postup výpočtu pro statické $P_{0r}[N]$ a dynamické $P_r[N]$ radiální ekvivalentní zatížení pochází z katalogu ZKL[55]. Dále je zde vypočten celkový třecí moment ložisek $M_t[N \cdot mm]$, výpočet pochází ze stránek ZKL[56]. Třecí moment je pouze odhadnut, nepřesnost výpočtu bude vyvážena při výběru krokového motoru s dostatečnou rezervou ve velikosti krouticího momentu.

7.1 Ložisko 61811

Tabulka 14 – Parametry ložiska 61811

Parametr	Popis	Hodnota
d_l	Průměr díry ložiska	55[mm]
D	Průměr vnějšího kroužku ložiska	72[mm]
B_l	Výška ložiska	9[mm]
C_r	Radiální základní dynamická únosnost	9,4[kN]
C_{or}	Radiální základní statická únosnost	8,8[kN]
F_r	Radiální zatížení ložiska	97,9[N]
F_a	Axiální zatížení ložiska	23[N]

7.1.1 Výpočet statické bezpečnosti

$P_{0r}[N]$ – radiální ekvivalentní statické zatížení

$$P_{0r} = 0,6F_r + 0,5F_a [N] \quad (P_{0r} \geq F_r) \quad (10)$$

$$P_{0r} = 0,6 \cdot 97,9 + 0,5 \cdot 23 [N]$$

$$P_{0r} = 70,24[N] \leq F_r \rightarrow P_{0r} = F_r = 97,9 [N]$$

$$s_0 = \frac{C_{or}}{P_{0r}} = \frac{8,8 \cdot 10^3}{97,9} \cong 89,9[-] \quad (11)$$

7.1.2 Odhad třecího momentu ložiska

$P_r[N]$ – radiálního ekvivalentní dynamické zatížení

$$\frac{F_a}{C_{or}} = \frac{23}{8,8 \cdot 10^3} = 2,61 \cdot 10^{-3} \rightarrow e = 0,22$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{23}{97,9} = 0,235 \geq e \rightarrow P_r = 0,56 \cdot F_r + 2 \cdot F_a [N]$$

$$P_r = 0,56 \cdot 97,9 + 2 \cdot 23 = 101[N] \quad (12)$$

Odhad třecího momentu ložiska $M_{t1}[N \cdot mm]$

$\mu = 0,0015[-]$ - konstantní součinitel tření pro daný typ ložiska [56]

$P_r = 101[N]$ – radiální ekvivalentní dynamické zatížení

$d_l = 55[mm]$ – průměr díry ložiska

$$M_{t1} = 0,5 \cdot \mu \cdot P_r \cdot d_l [N \cdot mm] \quad (13)$$

$$M_{t1} = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 101 \cdot 55 [N \cdot mm]$$

$$M_{t1} = 4,17[N \cdot mm]$$

Odhad třecího momentu ložiska 61811 se rovná $M_{t1} = 4,17[N \cdot mm]$.

7.2 Ložisko 61907

Tabulka 15 – Parametry ložiska 61811

Parametr	Popis	Hodnota
d_l	Průměr díry ložiska	35[mm]
D	Průměr vnějšího kroužku ložiska	55[mm]
B_l	Výška ložiska	10[mm]
C_r	Radiální základní dynamická únosnost	9,56[kN]
C_{or}	Radiální základní statická únosnost	6,8[kN]
F_r	Radiální zatížení ložiska	97,9[N]
F_a	Axiální zatížení ložiska	0[N]

7.2.1 Výpočet statické bezpečnosti

$P_{0r}[kN]$ – radiální ekvivalentní statické zatížení

$$P_{0r} = 0,6F_r + 0,5F_a [N] \quad (P_{0r} \geq F_r) \quad (14)$$

$$P_{0r} = 0,6 \cdot 97,9 + 0,5 \cdot 0 [N]$$

$$P_{0r} = 58,74[N] \leq F_r \rightarrow P_{0r} = F_r = 97,9 [N]$$

$$s_0 = \frac{C_{or}}{P_{0r}} = \frac{6,8 \cdot 10^3}{97,9} \cong 69,5[-] \quad (15)$$

7.2.2 Odhad třecího momentu ložiska

Výpočet radiálního ekvivalentního dynamického zatížení $P_r[N]$

$$\frac{F_a}{C_{or}} = \frac{0}{8,8 \cdot 10^3} = 0 \rightarrow e = 0,22$$

$$\frac{F_a}{F_r} = \frac{0}{97,9} = 0 \leq e \rightarrow P_r = 1 \cdot F_r + 0 \cdot F_a [N]$$

$$P_r = 1 \cdot 97,9 + 0 \cdot 0 = 97,9[N] \quad (16)$$

Odhad třecího momentu ložiska $M_t[N \cdot mm]$

$\mu = 0,0015[-]$ - konstantní součinitel tření pro daný typ ložiska [56]

$P_r = 97,9[N]$ – radiální ekvivalentní dynamické zatížení

$d_l = 35[mm]$ – průměr díry ložiska

$$M_{t2} = 0,5 \cdot \mu \cdot P_r \cdot d_l \quad (17)$$

$$M_{t2} = 0,5 \cdot 0,0015 \cdot 97,9 \cdot 35$$

$$M_{t2} = 2,57[N \cdot mm]$$

Odhad třecího momentu ložiska 61907 se rovná $M_{t2} = 2,57 [N \cdot mm]$.

7.2.3 Výpočet celkového třecího momentu ložisek

Celkový třecí moment ložisek: $M_t = M_{t1} + M_{t2} = 4,17 + 2,57 = 6,74 [N \cdot mm]$

8 Výpočet potřebného kroutícího momentu motoru

Pro návrh krokového motoru je nutné určit potřebný kroutící moment motoru $M_k[N \cdot m]$, který se skládá z již určeného třecího momentu ložisek $M_t[N \cdot mm]$ (viz. kapitola 7.2.3) a dynamického momentu $M_a[N \cdot mm]$, který vzniká při startu a brždění. Tyto momenty musí být v rovnováze, viz rovnice (18). Pro určení momentu $M_a[N \cdot m]$ je ale nejdříve nutné definovat parametry pohybu stolu.

$$0 = M_k - M_t - M_a [N \cdot m] \quad (18)$$

8.1 Parametry pohybu rotačního stolu

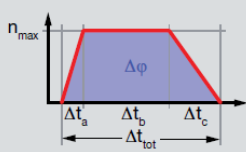
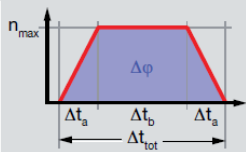
Na základě zkušeností získaných v kapitole 3.2 byl určen potřebný počet snímků na jednu otáčku $P_c = 24[-]$, dále byla určena doba $t_{tot} = 1,5[s]$, za kterou rotační stůl změni orientaci snímaného objektu mezi jednotlivými snímky. Z těchto předpokladů vychází výpočet úhlové dráhy jednoho cyklu $\varphi_\Delta[rad]$ (19), otáčky $n_{max}[rad \cdot s^{-1}]$ (20) a úhlového zrychlení při startu/brždění $\alpha_{max}[rad \cdot s^{-2}]$ (21).

Předpokládám symetrický profil pohybu ($t_a[s]$ doba zrychlování 20% (11), $t_b[s]$ - doba ustáleného pohybu 60% (12), $t_c[s]$ - doba brždění 20%).

$$\varphi_\Delta = \frac{2\pi}{P_c} = \frac{2\pi}{24} \cong 0,262[rad] \quad (19)$$

$$t_a = t_{tot} \cdot 0,2 = 1,5 \cdot 0,2 = 0,3[s] \quad (20)$$

$$t_b = t_{tot} \cdot 0,6 = 1,5 \cdot 0,6 = 0,9[s] \quad (21)$$

Profile	General	Symmetrical
Suitability		Long rotation at limited speed of rotation
Diagram		
Task:		
Travel an angle of $\Delta\varphi$ in time Δt_{tot}	$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{\Delta t_{tot} - \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}}$ $\alpha_{max} = \frac{\Delta\varphi}{\left(\Delta t_{tot} - \frac{\Delta t_a + \Delta t_c}{2}\right) \cdot \Delta t_a}$	$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\Delta\varphi}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a)}$ $\alpha_{max} = \frac{\Delta\varphi}{(\Delta t_{tot} - \Delta t_a) \cdot \Delta t_a}$

Obr 8.1 – Příručka MAXON, symetrický profil pohybu [57]

$$n_{max} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{\varphi_\Delta}{(t_{tot} - t_a)} = \frac{30}{\pi} \cdot \frac{0,262}{(1,5 - 0,3)} = 2,085[ot \cdot min^{-1}] = \quad (22)$$

$$\alpha_{max} = \frac{\varphi_\Delta}{(t_{tot} - t_a) \cdot t_a} = \frac{0,262}{(1,5 - 0,3) \cdot 0,3} = 0,728[rad \cdot s^{-2}] \quad (23)$$

8.2 Výpočet dynamického momentu rotujících částí

Pro určení dynamického momentu $M_a[N \cdot m]$ je nejprve nutné vypočítat moment setrvačnosti $J_c[kg \cdot mm^2]$ všech rotujících hmot stolu, viz. rovnice (24)

$$J_c = J_s + J_M \quad (24)$$

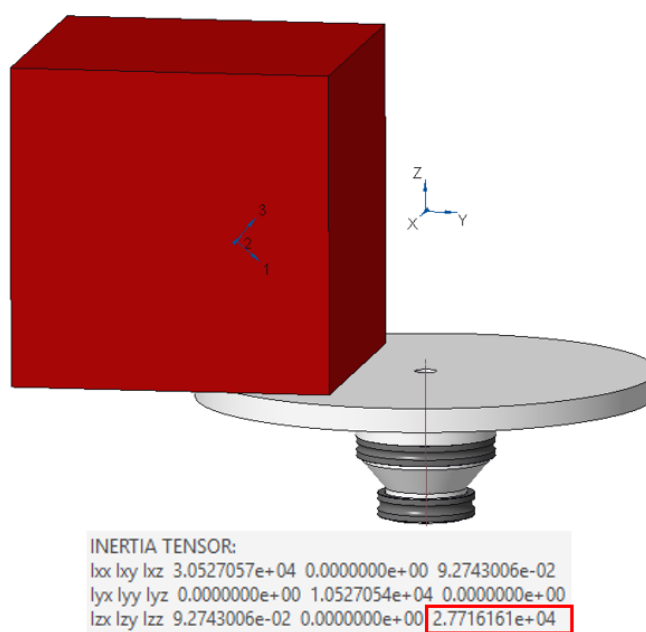
$J_s[kg \cdot mm^2]$ – moment setrvačnosti všech rotujících částí stolu a snímaného objektu

$J_M = 3,4[kg \cdot mm^2]$ – moment setrvačnosti rotoru krokového motoru, dle [58]

Výpočet momentu setrvačnosti $J_s[kg \cdot mm^2]$

Pro výpočet momentu setrvačnosti $J_s[kg \cdot mm^2]$ je uvažován krajní stav, kdy těžiště T skenovaného objektu je vychýleno vůči ose stolu o 100 mm. I když by při tomto krajním stavu snímaný objekt nejspíše spadl a takového zatížení je nepravděpodobné, bude pro dostatečnou rezervu kroutícího momentu motoru uvažován.

Do momentu setrvačnosti $J_s[kg \cdot mm^2]$ je zahrnuto: deska stolu, redukce, stavěcí ŠROUB M4x4 ISO 4766, ŠROUB M4x40 ISO 4762, PODLOŽKA 4 ISO 7089, vnitřní kroužky ložisek a snímaný objekt. Viz Obr 8.2.



Obr 8.2 – Určení momentu setrvačnosti všech rotujících hmot pomocí SW PTC Creo

Moment setrvačnosti rotujících hmot stolu a snímaného objektu:

$$J_s \cong 2,772 \cdot 10^4[kg \cdot mm^2].$$

Výpočet celkového momentu setrvačnosti $J_c[kg \cdot mm^2]$

$$J_c = J_s + J_M = 2,772 \cdot 10^4 + 3,4 = 2,772 \cdot 10^4[kg \cdot mm^2]$$

Výpočet dynamického momentu $M_a[N \cdot m]$

$J_c = 2,772 \cdot 10^4 [kg \cdot mm^2] = 2,772 \cdot 10^{-2} [kg \cdot m^2]$ – celkový moment setrvačnosti

$\alpha_{max} = 0,728 [\text{rad} \cdot s^{-2}]$ – maximální úhlové zrychlení stolu

$$\mathbf{M}_a = J_c \cdot \alpha_{max} [N \cdot m] \quad (25)$$

$$\mathbf{M}_a = 2,772 \cdot 10^{-2} \cdot 0,728 = 20,2 \cdot 10^{-3} [N \cdot m] = 20,2 [N \cdot mm]$$

8.3 Výpočet potřebného kroutícího momentu krokového motoru

Potřebný moment $\mathbf{M}_K [N \cdot mm]$:

$$\mathbf{M}_K = \mathbf{M}_a + \mathbf{M}_t = 20,2 + 6,74 = 26,44 [N \cdot mm] \quad (26)$$

Obecně se krokové motory volí tak, aby jejich maximální kroutící moment $\mathbf{M}_V [N \cdot m]$ byl při požadovaných otáčkách $n_{max} [\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$ alespoň dvakrát větší, než potřebný moment pro danou aplikaci $\mathbf{M}_K [N \cdot mm]$ viz. rovnice (28). Volí se tak proto, aby bylo zamezeno ztrátě kroků nebo úplnému zastavení motoru.

$\mathbf{M}_V [N \cdot m]$ – zvolený maximální kroutící moment krokového motoru

$$\mathbf{M}_V \geq 2 \cdot \mathbf{M}_K = 2 \cdot 26,44 = 52,88 [N \cdot mm] = 5,29 [N \cdot cm] \quad (27)$$

Požadovaný kroutící moment krokového motoru je roven $\mathbf{M}_V = 5,29 \cdot 10^{-2} [N \cdot m]$

9 Výběr elektroniky

Po definici zatížení stolu následuje výběr elektroniky rotačního stolu. Nejprve je na základě dat určených v kapitole 8 vybrán krokový motor. Poté driver motoru, řídicí jednotka, dálková spoušť fotoaparátu a zdroj.

9.1 Krokový motor

Jako pohon rotačního stolu byl vybrán krokový motor z důvodu snadného řízení polohy pomocí počítání kroků. Nevýhody jako trvalý odběr proudu, klesající krouticí moment s rostoucími otáčkami nebo malý poměr výkonu a hmotnosti [59] nejsou vzhledem napájení ze sítě, kyvnému pohybu stolu a statickému umístění relevantní.

Tabulka 16 – Výchozí parametry pro výběr krokového motoru

Parametr	Popis	Hodnota
M_V	Zvolený max. krouticí moment krokového motoru	5,29[N · cm]
H_{max}	Maximální délka statoru krokového motoru	28[mm]
n_{max}	Maximální otáčky krokového motoru	2,085[ot · min ⁻¹]

Otáčky krokového motoru jsou většinou uváděny ve frekvenci pulzů [pps]:

$$n_{max} = \frac{(2,085 \cdot 200)}{60} = 6,95[pps] \quad (\text{pro motor s 200 kroky na jednu otáčku})$$

17HS2408 [60]



Přidržený moment.: 12[N · cm]

Proudová zatížitelnost: 0,6 [A]

Délka: 28[mm]

Buzení: bipolární

Cena: 198[Kč]

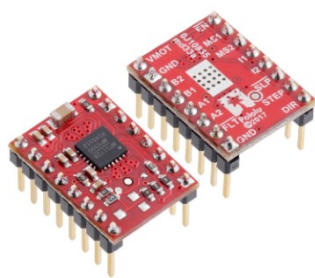
Obr 9.1 - 17HS2408 [60]

Na základě ceny a krouticího momentu byl vybrán motor 17HS2408. I když výrobce v katalogu [58] neuvádí křivku závislosti krouticího momentu motoru na otáčkách, na základě velikosti potřebných otáček $n_{max} = 2,085[\text{ot} \cdot \text{min}^{-1}]$ je předpokládáno, že krokový motor dokáže moment $M_V = 5,29[\text{N} \cdot \text{cm}]$ poskytnout.

9.2 Driver krokového motoru

Při výběru driveru je nutné se ujistit, jestli je maximální přípustný proud driveru větší než maximální proud krokového motoru a podporuje-li bipolární buzení.

MP6500 Stepper Motor Driver Carrier, Digital Current Control [61]



Maximální proud: 2 A

Pracovní proud: 1,5 A

Pracovní napětí: 4,5 - 35 V

Napětí logických pulzů: 2,1 - 6 V

Cena: 5,95 \$ \cong 151 Kč

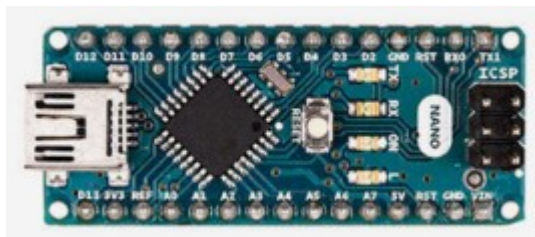
Obr 9.2 – MP6500 [61]

Na základě ceny a skutečnosti míry složitosti zapojení byl zvolen driver MP6500. Ten totiž obsahuje regulátor napětí, takže jej není nutné napájet z mikrokontroleru logickým napětím.

9.3 Řídící jednotka

K řízení obvodu lze využít jednodeskový počítač typu Raspberry Pi nebo jednodušší mikrokontrolér typu Arduino. Vzhledem k jednoduchosti navrženého obvodu je vhodnější použít mikrokontrolér.

Arduino Nano [62]



Obr 9.3 – Arduino Nano [62]

Vstupní napětí: 7-12V

Analogové piny: 8–

Digitálních piny: 22–

Proud I/O piny: 40mA

Clock speed: 16MHz

Paměť flash: 32kB

Rozměry: 18x45mm

Cena: 20[€] \cong 550[Kč]

9.4 Dálková spoušť fotoaparátu

Tento komponent zajišťuje komunikaci řídicí jednotky a mobilního telefonu skrze technologii Bluetooth. Je tak předán podnět řídicí jednotky k vyfotografování snímaného objektu. Při použití Bluetooth modulu lze fotoaparát mobilního telefonu ovládat pomocí SW CameraPro [63].

HC-05 Bluetooth Modul [64][65]

Obr 9.4 - HC-05 Bluetooth Modul [65]

Napájecí napětí: 3,3-6[V]

Bluetooth verze: 2.0

Pracovní frekvence: 2,4[GHz]

Dosah: <10[m]

Komunikace: USART (RX,TX)

Master/Slave režim

Cena: 179[Kč]

9.5 Napájecí zdroj

Na základě rozmezí funkčních napětí komponent (Arduino nano: 7-12V, driver MP6500: 4-35V) bylo zvoleno napětí stejnosměrného zdroje 12[V]. Podle proudového odběru [A] a pracovního napětí [V] navržených komponent je v této kapitole spočítán potřebný výkon napájecího zdroje $P[W]$ a poté vybrán zdroj.

Tabulka 17 – Potřebný napájecí výkon komponent

Komponent	Proudový odběr [A]	Pracovní napětí [V]	Výkon[W]
17HS2408	0,4	12	4,8
Arduino Nano	0,019	12	0,228
HC-05	0,03	3,3	0,099

Potřebný výkon napájecího zdroje:

$$P = 4,8 + 0,228 + 0,099 = 5,127[W] \quad (28)$$

Celkový proudový odběr:

$$I_c = 0,4 + 0,019 + 0,03 = 0,449[A] \quad (29)$$

Na základě potřebného výkonu a proudového odběru komponent byl vybrán tento zdroj:

Napájecí adaptér síťový 12V 1000mA 5,5/2,1 mm VIGAN [66]

Obr 9.5 – Napájecí adaptér Vigan [66]

Výstupní napětí: 12V

Výstupní proud: 1000mA

Výstupní výkon: 12W

Cena: 167Kč

9.6 Výběr dílčích komponent

Pro správnou funkci a zapojení výše vybraných komponent byly vybrány tyto součásti:

9.6.1 Spínač napájení

Kabel s vypínačem a konektory 5,5 x 2,1mm, 2x 15cm [67]



Jmenovité napětí: 24 V

Jmenovitý proud: 5A

Cena: 79Kč

Obr 9.6 - JACK 5,5 x 2,1mm [67]

9.6.2 Spínač logické funkce

Mikrospínač 6x6x10mm [68]



Spínané napětí: 12 V

Spínaný proud: 50mA

Cena: 4Kč

Obr 9.7 – Mikrospínač 6x6x10mm [68]

9.6.3 Konektor napájení

DC Barrel Jack Adapter[69]



Konektor: 5,5/2,1 [mm]

Kompatibilní s nepájivý kontaktním polem

Cena: 0,95[\$] = 24[Kč]

Obr 9.8 - DC Barrel Jack Adapter [69]

9.6.4 Ochranné prvky

Elektrolytický kondenzátor CE 47u/16V JAM-SS 6,3x7 RM2,5 BULK[70]



kapacita: 47 μF

napětí: 16 V

Cena: 1,9 Kč

Obr 9.9 - Elektrolytický kondenzátor [70]

Metalizované rezistory RM 1k 0207 0,6W 1%[71]



odpor: 1k Ω

cena: 2,9 Kč

Obr 9.10 - Metalizovaný rezistor RM 1k [71]

Metalizovaný rezistor RM 2k 0207 0,6W 1%[72]



odpor: 2k Ω

cena: 2,9 Kč

Obr 9.11 - Metalizovaný rezistor RM 2k [72]

Metalizovaný rezistor RM 10k 0207 0,6W 1% [73]



odpor: 10k Ω

cena: 2,9 Kč

Obr 9.12 - Metalizovaný rezistor RM 10k [73]

9.6.5 Deska plošných spojů

Cuprexit 120x80x1,5 jednovrstvý [74]



Cena: 39Kč

Pro uložení elektrických komponent bude použita deska plošných spojů.

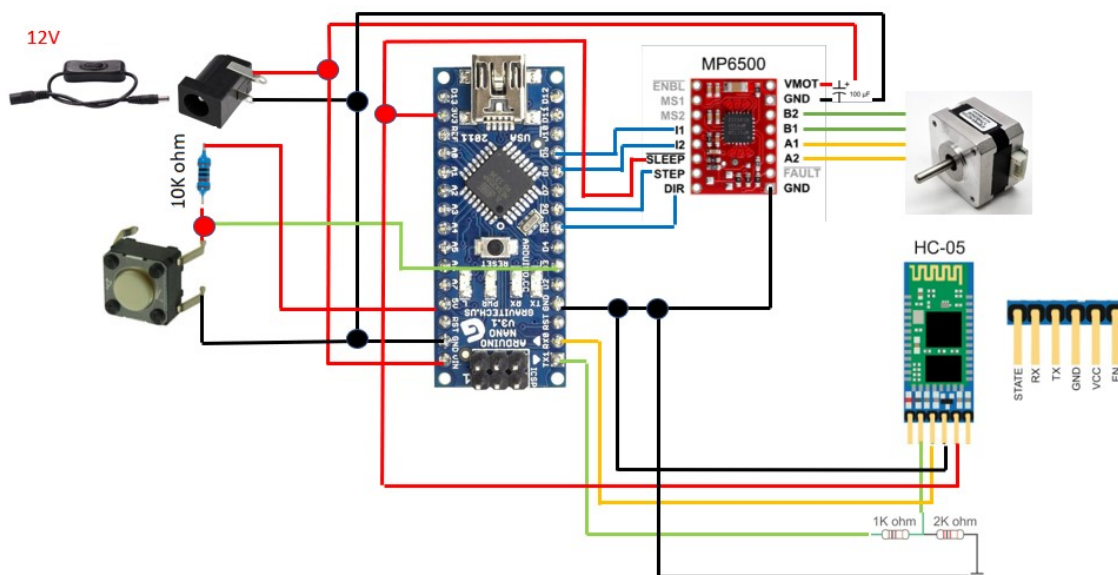
Obr 9.13 - Cuprexit 120x80x1,5 jednovrstvý [74]

10 Popis elektrického obvodu

V kapitole je blíže popsáno zapojení a funkce elektroniky v obvodu.

10.1 Popis funkce a zapojení obvodu

Po sepnutí spínače [67] na napájecí větvi je skrze síťový adaptér 12V 1000mA 5,5/2,1 mm VIGAN a konektor DC Barrel Jack Adapter přivedeno napětí **12[V]** na driver krokového motoru MP6500 (VMOT, GND) a mikrokontroler Arduino Nano (VIN, GND). Mezi piny driveru VMOT a GND musí být umístěn kondenzátor (alespoň $47\mu F$), který chrání driver před napěťovými špičkami při sepnutí spínače na napájecí větvi [61]. Napětí přivedené na Arduino Nano je pomocí jeho vestavěného regulátoru transformováno na hodnoty **3,3[V]** a **5[V]**. Napětí 3,3[V] z pinu 3v3 je dále vedeno na Bluetooth modul HC-05 (VCC, GND) a SLEEP pin driveru (nutné pro funkci driveru). Bluetooth modul HC-05 začíná vysílat a je již možné s ním spárovat mobilní telefon. Modul HC-05 komunikuje s Arduinem pomocí technologie UART skrze piny RXD, TXD. Jelikož pin RXD Bluetooth modulu HC-05 pracuje s napětím 3,3[V] a pin TXD Arduina s napětím 5[V], je nutné před RXD umístit napěťový dělič (dva sériově řazené rezistory). Odpor rezistorů vchází ze zapojení dle [75]. Poté, co uživatel spáruje svůj mobilní telefon s modulem HC-05, zmáčkne mikrospínač 6x6x10mm. Ten je připojen k Arduinu piny 5V, GND a digitálním pinem D3. Když je spínač rozeprt, je pomocí pull-up rezistoru ($10\text{ [k}\Omega\text{]}$) přiřazen pinu D3 signál HIGH, po sepnutí spínače se signál mění na LOW a dává podnět Arduinu k spuštění programu. Vykonávání programu je realizováno jako střídavé otáčení krokovým motorem o úhlovou dráhu $\varphi_c[\text{rad}]$ (viz kapitola 8.1) a vysílání signálů modulem HC-05 mobilnímu telefonu k vyfotografování snímaného objektu. Krokový motor je řízen čtyřmi piny (A2,A1,B1,B2) z driveru MP6500, ten přijímá signály z digitálních pinů Arduina (D9,D8,D6,D5) na své piny: STEP-počet kroků, DIR-směr otáčení, I1,I2-regulace proudu při mikrokrokování [61].



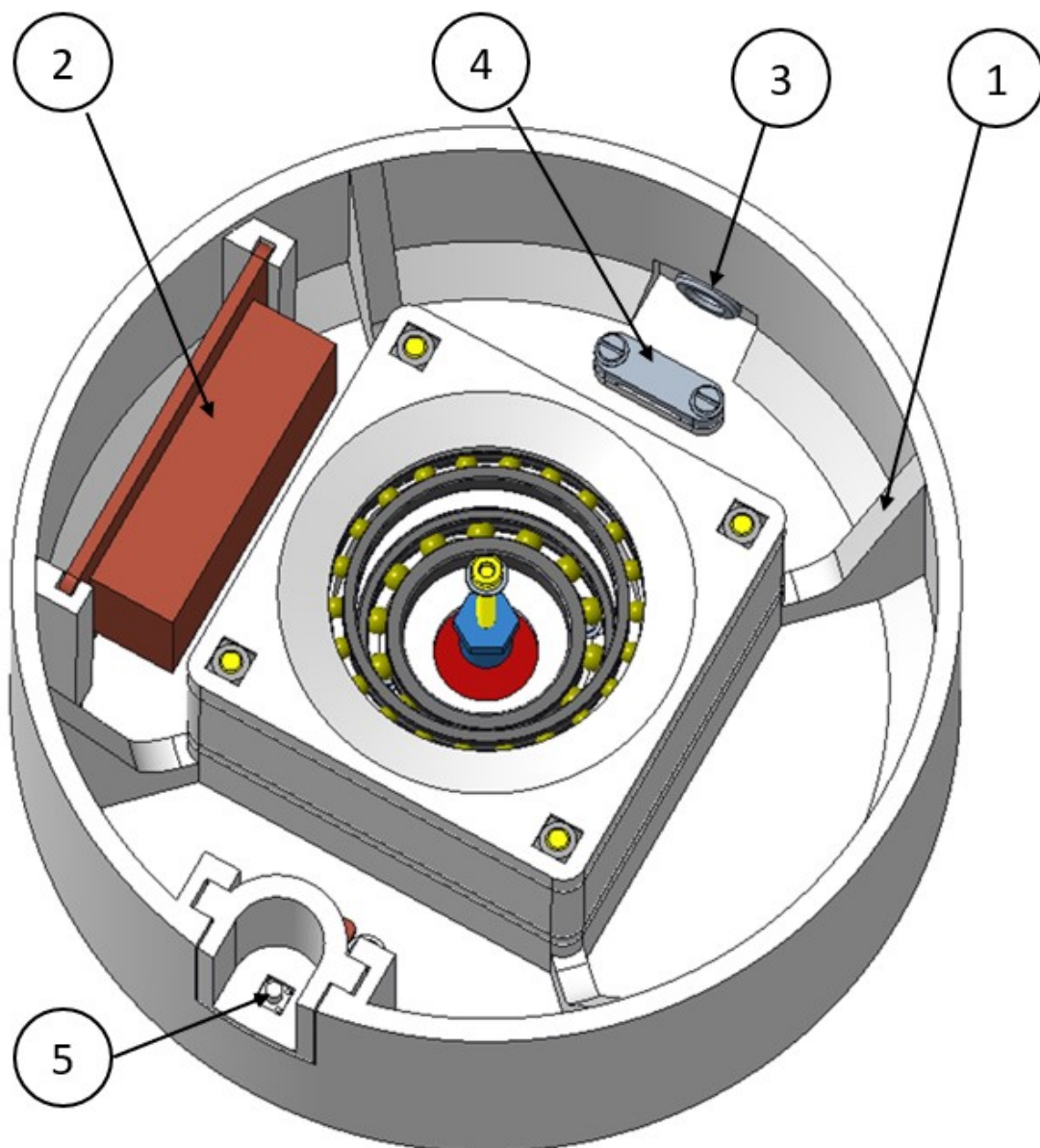
Obr 10.1 – Schéma zapojení elektrického obvodu

11 Popis rozpracované varianty

Varianta A byla dále rozpracována. V této kapitole je zvlášť popsána konstrukce rotačního stolu a stativu.

11.1 Rotační stůl

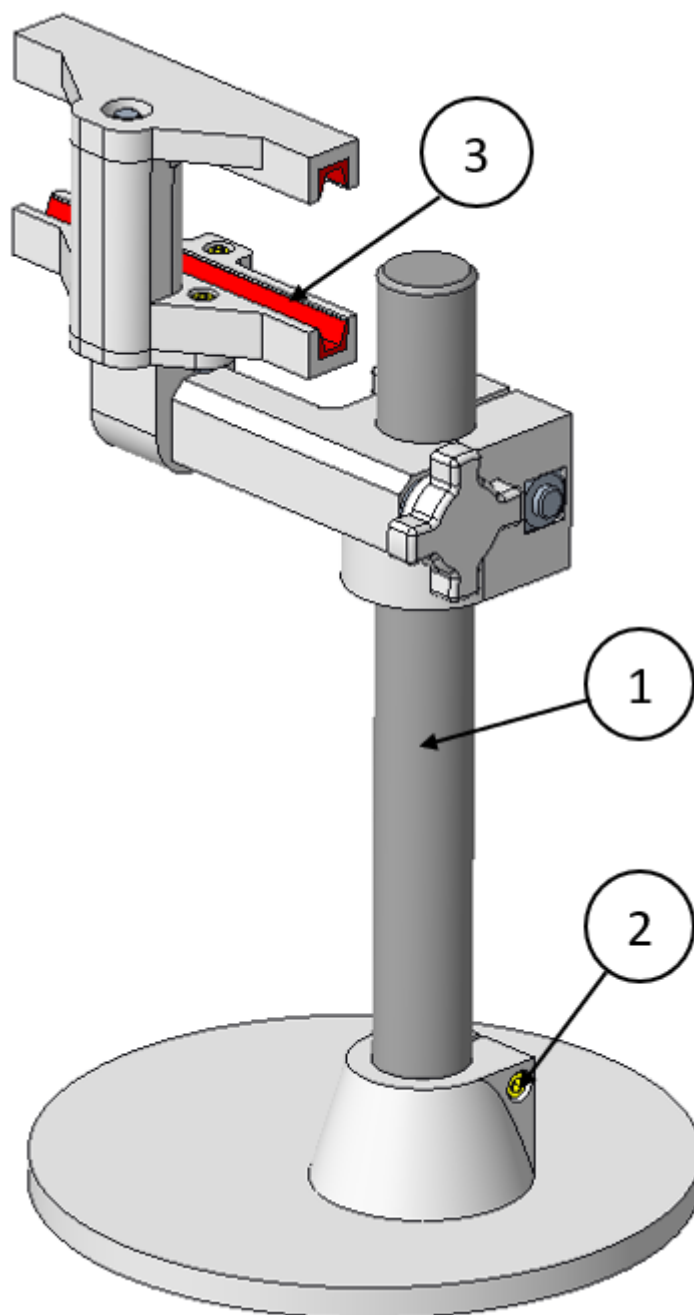
Varianta A byla dále rozpracována. Nově byla přidána žebra (1) zajišťující větší tuhost základny stolu. Deska plošných spojů osazená dříve popsanou elektronikou je zasunuta do dvou lišt (2). Odírání kabelu, o ostré hrany díry pro přívod napájecího kabelu ve stěně základny stolu, zabraňuje kabelová průchodka (3). Vytržení napájecího kabelu brání příchytka (4). Pro zahájení skenovacího cyklu slouží mikropsínač (5). Ten je umístěn vertikálně, aby při manipulaci s ním nedocházelo k posouvání stolu.



Obr 11.1 – Popis rozpracování rotačního stolu

11.2 Stativ

V konstrukci stativu byla nahrazena 3D tištěná tyč kruhovou hliníkovou tyčí [76] (1). Ta je připevněna k základně stativu pomocí svěrného spojení (2). Čelisti uchopovací části stativu byly doplněny o dvě vložky (3) z měkkého filamentu TPU 30D [77].



Obr 11.2 – Popis úprav stativu

12 Celkové náklady

V této kapitole jsou shrnuty všechny výdaje spojené s kompletací navrženého skenovacího systému.

12.1 Cena 3D tisku

Spotřeba filamentu byla určena pomocí software PrusaSlicer [78]

Tabulka 18 – Náklady spojené s 3D tiskem

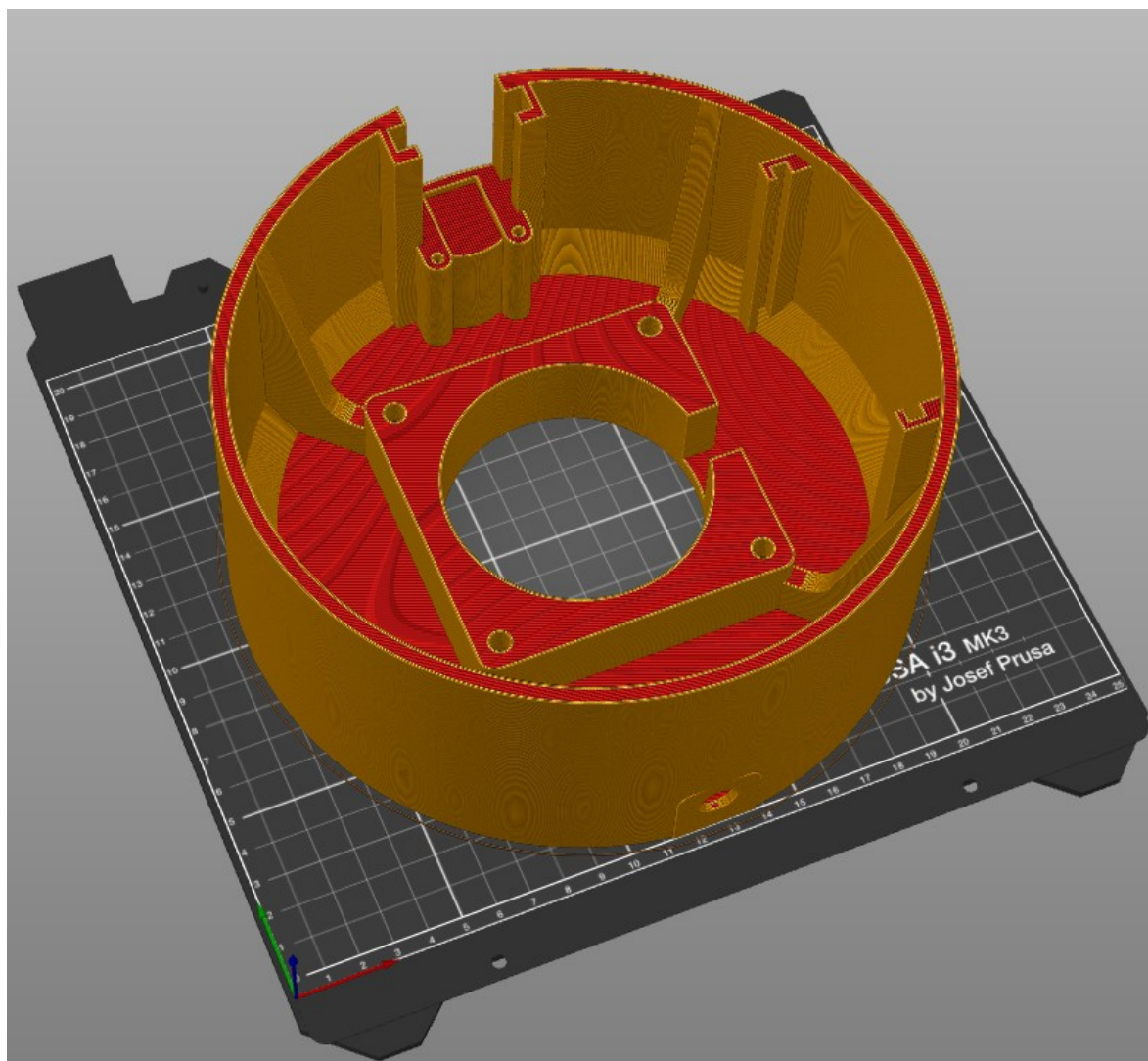
Typ filamentu	Měrná cena [Kč/kg]	Spotřeba [kg]	Cena [Kč]
PET-G [44]	475	0,956	454
TPU 30D [77]	980	$14,8 \cdot 10^{-3}$	14,5

12.2 Cena nakupovaných komponent

Tabulka 19 – Seznam nakupovaných komponent

Nakupované komponenty		
Název	Funkce	Cena [Kč]
Redukce [47]	Přenos krouticího momentu	36
Ložisko 61811 [45]	Uložení desky stolu	132
Ložisko 61907[46]	Uložení desky stolu	51
Pružina [48]	Zajišťuje sevření čelistí	44
17HS2408 [60]	Krokový motor-pohon stolu	198
MP6500 [61]	Driver krokového motoru	151
Arduino Nano [62]	Řídící jednotka	550
HC-05 BL Modul [65]	Komunikace s telefonem	179
VIGAN, 12V, 5,5x2,1 [66]	Napájecí zdroj systému	167
Spínač s konektorem. 5,5x2,1[67]	Sepnutí/vypnutí napájení	79
Mikrospínač 6x6x10mm [68]	Zahájení skenování	4
DC Barrel Jack Adapter [69]	Připojení kabelu zdroje	24
Elektrolytický kondenzátor	Chrání driver před napět. špičkami	1,9
1K, 2K Ohm rezistory	Redukce napětí na RX pinu HC-05	5,8
10K Ohm rezistor	Pull-up rezistor mikrospínače	2,9
DPS Cuprexitit 120x80x1,5	Zapojení jednotlivých komponent	39

Celkové náklady na výrobu a nákup komponent činí 2133[Kč].



Obr 12.1 – PrusaSlicer byl využit vyjádření spotřeby filamentu [78]

13 Závěr

Cílem bakalářské práce byl konstrukční návrh cenově dostupného 3D skenovacího systému, který pro snímání objektů využívá otočný stůl a nebo otočné rameno se snímacím zařízením. Dle zadání byla v úvodu práce zpracována analýza 3D skenovacích metod. Jelikož je problematika získávání trojrozměrných obrazů značně rozsáhlá, analýza byla zaměřena zejména na bezkontaktní optické metody. Součástí analýzy bylo také praktické testování metody strukturovaného světla (Kinect) a fotogrammetrie. Pro testování těchto metod byly využity dva referenční objekty. Na základě výsledku praktického měření byla pro navrhovaný systém vybrána metoda fotogrammetrie. Rozhodující byla dostupnost fotoaparátů v mobilních telefonech, široká škála bezplatných programů zajišťujících tvorbu modelů z fotografií a kvalita získaných dat. Velká časová náročnost této metody je vzhledem k neprofesionálnímu použití navrhovaného 3D skenovacího systému zanedbatelná.

Po zpracování úvodní analýzy a praktického měření byl shromážděn dostatek informací potřebných k formulaci požadavkového listu navrhovaného 3D skenovacího systému. Na základě instrukcí požadavkového listu byly navrženy čtyři varianty. První dvě varianty využívají otočného stolu a statického fotoaparátu. Součástí konstrukce je tedy i stativ mobilního telefonu. Výhodou těchto variant je menší komplikovanost konstrukce a při dosažení dobrých světelných podmínek i vysoká kvalita získaných dat. Nevýhodou je potřeba zajistit jednobarevné pozadí za snímaným objektem. Druhý pár konstrukčních variant pracuje se staticky umístěným objektem snímání, kolem kterého krouží rameno skeneru se snímacím zařízením (mobilním telefonem). Při snímání pomocí těchto variant není nutno vykonávat žádné přípravné úkony. Výhodou je tedy jednoduché zahájení snímacího procesu.

Na základě kritériální analýzy, jejíž kritéria zohledňovala zejména spotřebu filamentu a cenu nakupovaných komponent, byla vybrána nejjednodušší varianta A. Optimální varianta využívá rotačního stolu, v jehož středu je umístěn krokový motor a řídicí elektronika.

V další části této práce je proveden návrh krokového motoru na základě tření v ložiscích a setrvačných hmot působících proti pohybu stolu. Po návrhu krokového motoru byly postupně navrženy další komponenty elektrického obvodu systému. Z nichž hlavní jsou driver krokového motoru, mikrokontroler, Bluetooth modul pro komunikaci s mobilním telefonem a zdroj napětí.

Po vypracování detailního modelu a výkresové dokumentace byly vyčísleny náklady na výrobu navrhovaného systému, zahrnující množství použitého filamentu a cenu nakupovaných komponent. Výsledné náklady jsou výrazně nižší než pořizovací cena skenerů srovnatelné přesnosti. Navržený systém tedy představuje zajímavou alternativu pro majitele 3D tiskáren, kteří chtějí získávat modely pro své nové projekty jednoduše a levně.

14 Použitá literatura

- [1] PERREAULT, Aaron. What You Need to Know About 3D Scanning [online]. 2016 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <http://3dscanningservices.net/blog/need-know-3d-scanning/>
- [2] Introduction to 3D Scanning [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <http://mesh.brown.edu/3DP-2012/pdfs/3DP-2011-lecture-2.pdf>
- [3] DELLEPIANE, Matteo. Grafica 3D per i beni culturali: 3D scanning [online]. 2012 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: http://vcg.isti.cnr.it/~dellepiane/Corso_2012/6_3DScanning.pdf
- [4] LI, Hao. 3D Scanning [online]. 2015 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <http://www.hao-li.com/cs599-ss2015/slides/Lecture04.2.pdf>
- [5] ČERMÁK, Jan. METODY 3D SKENOVÁNÍ OBJEKTŮ [online]. 2015 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=103850
- [6] JECIĆ, Stjepan a Nenad DRVAR. THE ASSESSMENT OF STRUCTURED LIGHT AND LASER SCANNING METHODS IN 3D SHAPE MEASUREMENTS [online]. [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://bib.irb.hr/datoteka/170686.p126.pdf>
- [7] Reverse engineering gets destructive. PlasticsToday [online]. 1997 [cit. 2020-03-13]. Dostupné z: <https://www.plasticstoday.com/content/reverse-engineering-gets-destructive/895305322691>
- [8] REVO RSP2. DirectINDUSTRY [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/renishaw/product-5200-1654168.html>
- [9] Coordinate-measuring machine [online]. [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Coordinate-measuring_machine
- [10] SADAoui, Sif Eddine, Charyar MEHDI-SOUZANI a Claire LARTIGUE. Combining a touch probe and a laser sensor for 3D part inspection on CMM [online]. 2017 [cit. 2020-03-14]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/323925045_Combining_a_Touch_Probe_and_a_Laser_Sensor_for_3D_Part_Inspection_on_CMM
- [11] 3D laser scanner: Zephyr III. Kreon [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <http://kreon3d.com/3d-scanners/zephyr-iii/>
- [12] FARO® DESIGN SCANARM. FARO® [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://www.faro.com/products/3d-design/faro-design-scanarm/>
- [13] How Laser Trackers Work. Schaeffer Precision Alignment [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <http://www.schaefferprecision.com/blog/how-laser-trackers-work>

- [14] HANDYPROBE NEXT. CREAFORM [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.creaform3d.com/en/metrology-solutions/coordinate-measuring-machines-handyprobe>
- [15] STRIČEK, Daniel. Kam směřuje průmyslová CT. DPS Elektronika od A do Z [online]. 2013 [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.dps-az.cz/vyroba/id:3418/kam-smeruje-prumyslova-ct>
- [16] What is an MRI scan? Medical News Today [online]. [cit. 2020-03-16]. Dostupné z: <https://www.medicalnewstoday.com/articles/146309#what-is-an-mri-scan>
- [17] BURSCHKA, Darius, Myron Z. BROWN a Gregory D. HAGER. Advances in Computational Stereo [online]. 2003 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/3193579_Advances_in_Computational_Stereo
- [18] ZED 2. STEREO LABS [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://www.stereolabs.com/zed-2/>
- [19] ALICEVISION Photogrammetric Computer Vision Framework. AliceVision [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://alicevision.org/>
- [20] Photogrammetry vs. 3D Scanning. 3SPACE [online]. 2019 [cit. 2020-03-17]. Dostupné z: <https://3space.com/blog/photogrammetry-vs-3d-scanning/>
- [21] Photogrammetry 2 – 3D Scanning simpler, better than ever! PRUSAPRINTERS BLOG [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://blog.prusaprinters.org/photogrammetry-2-3d-scanning-simpler-better-than-ever/>
- [22] EL-HAKIM, Sabry, Jean-Angelo BERALDIN a François BLAIS. A Comparative Evaluation of the Performance of Passive and Active 3-D Vision Systems [online]. 2003 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/2885918_A_Comparative_Evaluation_of_the_Performance_of_Passive_and_Active_3-D_Vision_Systems
- [23] T-SCAN 5. DIRECT INDUSTRY [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.directindustry.com/prod/hexagon-manufacturing-intelligence/product-5623-1574800.html>
- [24] Laser Scanner vs Structured Light Scanner: which should you choose? 3D natives [online]. 2019 [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.3dnatives.com/en/laser-3d-scanner-vs-structured-light-3d-scanner-080820194/>
- [25] AICON SmartScan. HEXAGON [online]. [cit. 2020-03-18]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/products/white-light-scanner-systems/aicon-smartscan>
- [26] Kinect. Wikipedia [online]. [cit. 2020-05-01]. Dostupné z: <https://en.wikipedia.org/wiki/Kinect#/media/File:Xbox-360-Kinect-Standalone.png>
- [27] LI, Larry. Time-of-Flight Camera - An Introduction. MOUSER [online]. [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://cz.mouser.com/applications/time-of-flight-robotics/>

- [28] GOKTURK, Burak, Hakan YALCIN a Cyrus BAMJI. A Time-Of-Flight Depth Sensor – System Description, Issues and Solutions [online]. 2004 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: https://web.archive.org/web/20070623233559/http://www.canesta.com/assets/pdf/technicalpapers/CVPR_Submission_TOF.pdf
- [29] Optical encoders and LiDAR scanning. RENISHAW [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.renishaw.cz/cs/optical-encoders-and-lidar-scanning--39244>
- [30] FARO® FOCUS LASER SCANNERS. FARO® [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.faro.com/products/construction-bim/faro-focus/>
- [31] Interferometry explained. RENISHAW [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.renishaw.com/en/interferometry-explained--7854>
- [32] HARDING, Kevin. Handbook of Optical Dimensional Metrology [online]. CRC Press, Taylor & Francis Group, 2013, , 100-103 [cit. 2020-03-19]. Dostupné z: <https://books.google.cz/books?id=OUbNBQAAQBAJ&pg=PA114&lpg=PA114&dq=smr+cmm+probe&source=bl&ots=CHV4bFsXzG&sig=ACfU3U3SaomJVebwEy76IOhx85IbCrM5BQ&hl=en&sa=X&ved=2ahUKEwiY5djl3Z7oAhXpQkEAHeZgD2MQ6AEwA3oECAoQAQ#v=onepage&q=smr%20cmm%20probe&f=false>
- [33] Leica Absolute Tracker AT960. HEXAGON [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.hexagonmi.com/cs-CZ/products/laser-tracker-systems/leica-absolute-tracker-at960>
- [34] CIGNONI, CALLIERI, CORSINI, DELLEPIANE, GANOVELLI a RANZUGLIA. MeshLab: an Open-Source Mesh Processing Tool [online]. 2008 [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://vcg.isti.cnr.it/Publications/2008/CCCDGR08/MeshLabEGIT.final.pdf>
- [35] Meshlab: Support. MeshLab [online]. [cit. 2020-03-25]. Dostupné z: <http://www.meshlab.net/#support>
- [36] Autodesk Meshmixer. Meshmixer [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://www.meshmixer.com/>
- [37] CloudCompare. Danielgm [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.danielgm.net/cc/>
- [38] Laserový skener CICLOP. NA3D.cz [online]. [cit. 2020-05-16]. Dostupné z: https://www.na3d.cz/p/3842/laserovy-skener-ciclop?gclid=Cj0KCQjwnv71BRCOARIsAIkxW9HHvIxrNBjlx6BtFaKZQZDzzS8bAWDvJTtQlQtTueHZhLOWxBxfyzYaAm-GEALw_wcB
- [39] Skanect. SKANECT [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://skanect.occipital.com/download/#sensors>
- [40] SCENE Capture. FARO 3D App Center [online]. [cit. 2020-03-31]. Dostupné z: <https://3d-apps.faro-europe.com/product/scene-capture/>

- [41] GIMP GNU Image Manipulation Program. GIMP [online]. [cit. 2020-05-02]. Dostupné z: <https://www.gimp.org/>
- [42] FUHRMANN, Simon, Fabian LANGGUTH a Michael GOESELE. MVE – A Multi-View Reconstruction Environment [online]. 2014 [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <https://www.gcc.tu-darmstadt.de/media/gcc/papers/Fuhrmann-2014-MVE.pdf>
- [43] WU, Changchang. VisualSFM. Ccwu.me [online]. [cit. 2020-03-30]. Dostupné z: <http://ccwu.me/vsfm/>
- [44] PET-G FILAMENT 1,75 MM ČERNÝ DEVIL DESIGN 1 KG. Materialpro3d.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/1-75-mm-2/pet-g-1-75mm-cerny-dd/>
- [45] 61811. Zkl-loziska.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.zkl-loziska.cz/kulickova-loziska/61811/>
- [46] 61907. Agrond.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.agrond.cz/61907-ZVL-d606.htm>
- [47] Hex Motor Shaft Coupler for Robotic Wheel / Ø5mm. Handsontec.com [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://handsontec.com/index.php/product/hex-motor-shaft-coupler-for-robotic-wheel-5mm-2/>
- [48] C.167.080.0600.I. Vanel.com [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.vanel.com/spring-details.php?lang=english&ref=C.167.080.0600.I&sessionId=1581961941375e91693eb68d1664225350991467451670626>
- [49] Ložisko kuličkové 7207 B. Agrozet.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: https://www.agrozet.cz/e-shop/lozisko-kulickove-7207-b-d55491.html?gclid=CjwKCAjwwYP2BRBGEiwAkoBpAmqDD0FNi1zLPFxcF7xBFsSBMwjFFqEUPL5qH4jJ-z4F8QPoD5wlnxoCGS0QAvD_BwE
- [50] ZKL 62200-2RS Kuličkové ložisko. Mateza.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: https://www.mateza.cz/e-shop/41313-lozisko-zkl-62200-2rs?gclid=CjwKCAjwwYP2BRBGEiwAkoBpAuxEKp4wwLk_cePReS0afwwzrbpbhWGUBrKbhj7bfMkNkXl_Pur3BoCV2UQAvD_BwE
- [51] Segerová pojistka na hřídel DIN 471. Gufero.com [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.gufero.com/eshop-kosik.html?zamerit=0>
- [52] K0007 Osové čepy. Kipp.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.kipp.cz/cz/cs/Produkty/Ov1%C3%A1dac%C3%AD-prvky-normovan%C3%A9-d%C3%ADly/Up%C3%ADnac%C3%AD-n%C3%A1%C5%99ad%C3%AD/K0007-Osov%C3%A9-%C4%8Depy.html>
- [53] Ložisko 61900-2RS MTM. Proprumysl.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z: <https://www.proprumysl.cz/lozisko-61900-2rs->

- mtm/?gclid=CjwKCAjwwYP2BRBGEiwAkoBpAmamdUsWG5dWVsbBNQkuOFbmT
ERA9ARyBxOkdRKKUQXc4qE__qakQRoClZEQAvD_BwE
- [54] 16022 ZVL. Agrond.cz [online]. [cit. 2020-05-17]. Dostupné z:
<https://www.agrond.cz/16022-ZVL-d121.htm>
- [55] ZKL GROUP ROLLING BEARINGS [online]. Ideal graphic design studio, 2013, 221-
231 [cit. 2020-05-06]. Dostupné z: <https://www.arkov.cz/katalogy-ke-stazeni>
- [56] VÝPOČET TŘECÍHO MOMENTU. ZKL.cz [online]. [cit. 2020-05-06]. Dostupné z:
<http://www.zkl.cz/cs/pro-konstruktery/6-mezni-otacky-vibrace>
- [57] BRAUN, Jan. Formulae Handbook Maxon Academy [online]. 2012, 17-18 [cit. 2020-
05-13]. Dostupné z: [http://storkdrives.com/wp-content/uploads/2013/10/1-
Formelsamling.pdf](http://storkdrives.com/wp-content/uploads/2013/10/1-Formelsamling.pdf)
- [58] HB Stepper Motor Catalog, Motion King. Drive.google.com [online]. [cit. 2020-05-11].
Dostupné z:
<https://drive.google.com/file/d/0B4B30jzMyzG8UzBQQXA4MDU0TGs/view>
- [59] ŘEZÁČ, Kamil. Krokové motory. Robotika.cz [online]. 2002 [cit. 2020-05-11].
Dostupné z: <https://robotika.cz/articles/steppers/cs>
- [60] Krokový motor NEMA 17 17HS2408 0,12Nm. Laskaarduino.cz [online]. [cit. 2020-05-
11]. Dostupné z: [https://www.laskaarduino.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs2408-0-
12nm/](https://www.laskaarduino.cz/krokovy-motor-nema-17-17hs2408-0-12nm/)
- [61] MP6500 Stepper Motor Driver Carrier, Digital Current Control. Pololu.com [online].
[cit. 2020-05-11]. Dostupné z: <https://www.pololu.com/product/2968>
- [62] ARDUINO NANO. Store.arduino.cc [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
<https://store.arduino.cc/arduino-nano>
- [63] CameraPro. Tequnique.com [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
<https://www.tequnique.com/camerapro.php>
- [64] HC-05 - Bluetooth Module. Components101.com [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné
z: <https://components101.com/wireless/hc-05-bluetooth-module>
- [65] Bluetooth modul HC-05. GME.cz [online]. [cit. 2020-04-19]. Dostupné z:
<https://www.gme.cz/bluetooth-modul-hc-05>
- [66] Napájecí adaptér síťový 12V 1000mA 5,5/2,1 mm VIGAN. Arduino-shop.cz [online].
[cit. 2020-05-12]. Dostupné z: [https://arduino-shop.cz/arduino/1441-napajeci-adapter-
sitovy-12v-1000ma-5-5-2-1-mm-vigan.html](https://arduino-shop.cz/arduino/1441-napajeci-adapter-sitovy-12v-1000ma-5-5-2-1-mm-vigan.html)
- [67] Kabel s vypínačem a konektory 5,5 x 2,1mm, 2x 15cm. Shop.atoselektro.cz [online].
[cit. 2020-05-12]. Dostupné z: [https://shop.atoselektro.cz/kabel-s-vypinacem-a-
konektory-5-5-x-2-1mm-2x-15cm_d99196.html](https://shop.atoselektro.cz/kabel-s-vypinacem-a-konektory-5-5-x-2-1mm-2x-15cm_d99196.html)
- [68] Arduino tlačítko. Arduino-shop.cz [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z:
<https://arduino-shop.cz/arduino/919-arduino->

- tlacitko.html?gclid=CjwKCAjwkun1BRAIEiwA2mJRWbsclZ-Ffv1vIdH7YJdHE-LWtG6FHhmkIFwqam2LOny_sLtOaZ64xhoCbrgQAvD_BwE
- [69] DC Barrel Jack Adapter - Breadboard Compatible. Sparkfun.com [online]. [cit. 2020-05-12]. Dostupné z: <https://www.sparkfun.com/products/10811>
- [70] Elektrolytický kondenzátor CE 47u/16V JAM-SS 6,3x7 RM2,5 BULK. GME.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/ce-47u-16v-jam-ss-6-3x7-rm2-5-bulk>
- [71] Metalizovaný rezistor RM 1k 0207 0,6W 1%. GME.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rm-1k-0207-0-6w-1>
- [72] Metalizovaný rezistor RM 2k 0207 0,6W 1%. GME.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rm-2k-0207-0-6w-1>
- [73] Metalizovaný rezistor RM 10k 0207 0,6W 1%. GME.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.gme.cz/rm-10k-0207-0-6w-1>
- [74] Cuprexit 120x80x1,5 jednovrstvý. Arduino-shop.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: https://arduino-shop.cz/arduino/1414-cuprexit-120x80x1-5-jednovrstvy.html?gclid=CjwKCAjwwYP2BRBGEiwAkoBpAjt1s5hAOUJmOzN7fRZELIrVhkp8xgfhM3Nk4xZ9kT-4kWbkibxn-xoCLF4QAvD_BwE
- [75] HC-05 and HC-06 zs-040 Bluetooth modules. First Look. Martyncurrency.com [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <http://www.martyncurrency.com/hc-05-and-hc-06-zs-040-bluetooth-modules-first-look/>
- [76] Hliníková tyč kruhová pr. 30 6063. Ehlinik.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.ehlinik.cz/hlinikova-tyc-kruhova-pr-30-6063/pro-6YU0000101.html>
- [77] FIBERFLEX FILAMENT ČERVENÝ 30D 1,75MM FIBERLOGY 850G. Materialpro3d.cz [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.materialpro3d.cz/tpu/fiberflex-filament-cerveny-30d-1-75mm-fiberlogy-850g/>
- [78] PrusaSlicer. Prusa3d.com [online]. [cit. 2020-05-18]. Dostupné z: <https://www.prusa3d.com/prusaslicer/>

15 Přílohy

Výkresová dokumentace

Sestavný výkres otočného stolu

Sestavný výkres stativu

Sestavný výkres uchopovací části stativu